Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica

Automatización de un equipo de calibración para medidores de radiación

Por:

Sergio Ernesto Levy Maduro Alfaro

Ciudad Universitaria "Rodrigo Facio", Costa Rica

Diciembre del 2013

Automatización de un equipo de calibración para medidores de radiación

Por:

Sergio Ernesto Levy Maduro Alfaro

IE-0499 Proyecto eléctrico

Aprobado por el Tribunal:

Mauricio Espinoza B., Ing
Profesor guía

Marvin Segura , Ing.
Profesor lector

José David Rojas, PhD.
Profesor lector

Resumen

Este proyecto consistió en diseñar una interfaz gráfica para controlar un equipo de calibración de medidores de radiación. Para esto se partió de dos proyectos previos y se añadió un bloque para: monitoreo del sistema, medición por medio de un láser DLS-CH30 marca $DIMETIX^{®}$ y para encendido y apagado de la fuente de radiación. Los trabajos precedentes eran para control de filtros y control de posición de una plataforma. El acople y la creación de estos sistemas se logró mediante el uso del programa $LabVIEW^{®}$ y la utilización de tres microcontroladores Arduino Uno para adquisición de datos.

El propósito de automatizar el sistema de calibración de medidores de radiación, tenía como fin agilizar el proceso y reducir la exposición a la radiación del usuario. Partiendo de la base fijada por los proyectos anteriores, se desarrolló un programa con los siguientes requisitos solicitados por el Centro de Investigación en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares (CICANUM):

- Un módulo para encender y apagar la fuente de radiación.
- Un módulo de seguridad que apague la fuente, o la mantenga apagada, en caso de que la puerta de la habitación en el que se encuentra el sistema esté abierta.
- Un módulo de monitoreo para observar el proceso de calibración desde afuera de la habitación.
- Un módulo de medición utilizando un láser.

El módulo de seguridad y el de control de encendido/apagado de la fuente, se realizaron mediante lógica combinacional y sensores de contacto. Ambos elementos se utilizaron para detectar el estado de la fuente y de la puerta de la habitación. Se usó el programa $iSpy^{®}$ para el monitoreo y el software de fábrica del láser $LaserUtility^{®}$ para la medición. Estos se ejecutan desde $LabVIEW^{®}$.

Para validar el proyecto terminado, se implementaron LEDs para verificar las señales de salida e interruptores para las entradas. Estas se conectaron al sistema mediante los Arduinos y se simuló la operación del sistema de calibración controlado por la interfaz diseñada.

La interfaz permite, desde la computadora: encender y apagar la fuente de radiación, definir la posición del medidor de radiación, regular la intensidad de radiación cambiando los filtros, observar desde otra habitación el proceso de calibración y medir la distancia del sensor de radiación por medio de un láser.

Índice general

Índice de figuras **viii**

Nomenclatura **xi**

1 Introducción **1**
1.1 Introducción del informe 1
1.2 Objetivos 2
1.3 Metodología 3

2 Antecedentes **5**
2.1 Radiación 5
2.2 Sistema existente para calibrar medidores de radiación 10

3 Desarrollo **13**
3.1 Diseño del módulo de encendido/apagado 13
3.2 Circuito para probar el funcionamiento del módulo diseñado . . 18
3.3 Interfaz del sistema de encendido y apagado de la fuente 22
3.4 Interfaz del sistema completo 25
3.5 Validación del sistema 29

4 Conclusiones y recomendaciones **33**

Bibliografía **35**

A Manual de usuario e instrucciones de conexión del sistema de posicionamiento y del sistema de encendido y apagado de la fuente **37**
A.1 Manual para el uso de la interfaz gráfica 38
A.2 Conexión del sistema 42

B Manual de usuario e instrucciones de conexión del hardware para el sistema de control de filtros **47**
B.1 Instrucciones de conexión del hardware 47
B.2 Manual de usuario 50

C Hojas de fabricante de los componentes usados en el proyecto completo **57**

Índice de figuras

2.1 Medidor de cámara gaseosa (Gil, 2013) 8
2.2 Medidor de centelleo (Gil, 2013) 8
2.3 Fuente de radiación 10
2.4 Vista lateral de la plataforma de medición 11
2.5 Vista superior de la plataforma de medición 11

3.1 Tabla de la verdad del sistema bajo estudio 14
3.2 Esquema de los cuatro casos generales del sistema 15
3.3 Esquema de las subdivisiones de casos generales 16
3.4 Diagrama ASM 17
3.5 Lógica combinacional implementada 18
3.6 Módulo de interruptores 19
3.7 Conexión del Arduino 20
3.8 Módulo de inversores 21
3.9 Conexión del puente H 22
3.10 LEDs del sistema para encendido y apagado 23
3.11 Interfaz del sistema de encendido/apagado con indicadores y el sistema de ejecución de programas alternos 24
3.12 Interfaz del sistema de encendido y apagado de la fuente 24
3.13 Interfaz del sistema completo 25
3.14 Sección del sistema de posicionamiento 26
3.15 Inferfaz de la pestaña Rutinas 27
3.16 Ventana para especificar puntos 27
3.17 Sección del sistema de selección de puertos y detener el programa . 28
3.18 Sección del sistema de selección de filtros 28
3.19 Circuito de validación del sistema de encendido y apagado 30
3.20 Circuito para validación del sistema de posicionamiento 30
3.21 Circuito para validación del sistema de control de filtros 31

A.1 Interfaz del sistema completo 39
A.2 Interfaz de modo manual 40
A.3 Ventana para introducir puntos 41
A.4 Esquema de conexión general 42
A.5 Módulo de inversores 43
A.6 PCB del sistema de posicionamiento visto desde el lado opuesto al del soldador 45

B.1 Conexión del L298 con el motor a pasos bipolar 48
B.2 Motor de 6 conductores 48
B.3 Esquemático de la interfaz de optoacoples 49
B.4 Implementación en una *protoboard* de la interfaz de optoacoples . . 49
B.5 Esquemático de un optoacople del sensor infrarrojo 50
B.6 Implementación en una *protoboard* de los sensores 50
B.7 Curva de velocidad torque para el 780079-01 de National Instruments 53
B.8 Esquemático de la fuente propuesta 54

Nomenclatura

$CICANUM$	Centro de Investigación de Ciencias Atómicas Nucleares y Moleculares.
$LabVIEW$®	Acrónimo de "Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench" Software de la compañía $NationalInstruments$® para programación gráfica por medio de bloques.
$ArduinoUno$	Tarjeta con un microcontrolador y con capacidad de manejo de entradas tanto digitales como analógicas y de salidas digitales.
SCP	Sensor de contacto de la puerta.
SCS	Sensor de contacto superior.
SCI	Sensor de contacto inferior.
A	Señal de control para solicitar el encendido o apagado de la fuente.
G	Señal de control para manipular la polaridad de la tensión que le llega al motor.
EN	Señal de control para habilitar o deshabilitar el motor para encender o apagar la fuente.
$LEDs$	Diodos emisores de luz, LED es por sus siglas en inglés "Light Emitting Diode".
TTL	Lógica transistor transistor, TTL es por sus siglas en inglés "Transistor Transistor Logic".

1 Introducción

1.1 Introducción del informe

El Centro de Investigaciones de Ciencias Atómicas Nucleares y Moleculares, más conocido por sus siglas CICANUM, es el único centro del país especializado en tecnologías nucleares. Tiene laboratorios equipados con avanzada tecnología y personal altamente capacitado. Brinda servicios de dosimetría personal, calibración de instrumentos dosimétricos, análisis radiométrico y cursos para capacitar sobre protección radiológica (CICANUM, 2013).

Actualmente el sistema para calibración dosimétrica opera manualmente. Para calibrar un equipo de medición, hay que trasladarse del cuarto donde está el sistema, para poder manipularlo, al cuarto de computadoras para procesar la información. Es decir, el usuario tiene que: abrir o cerrar la fuente, cambiar los filtros de intensidad de la radiación, ubicar los sensores en la posición deseada y tomar los datos, manualmente. El proceso deja una gran brecha para mejoras, que podrían ser cubiertas por la automatización del mismo.

Automatizar el procedimiento, aceleraría el trabajo y reduciría la exposición del usuario a la radiación. Este proyecto surge para cubrir esta necesidad y consiste en el acople bajo una sola interfaz, realizada en $LabVIEW^{®}$, de los proyectos existentes y otros subsistemas por realizar. La idea es controlar por computadora, cada uno de los subsistemas involucrados en el proceso de calibración. Entre los módulos, los cuales se explicarán posteriormente, se encuentran:

- Módulo de seguridad.
- Módulo de monitoreo.
- Módulo de ubicación cartesiana.
- Módulo de variación de intensidad de la fuente de radiación.

Los proyectos ya existentes son: el de variación de intensidad de la radiación por medio del cambio de filtros y el proyecto de ubicación cartesiana de los medidores. Estos fueron hechos respectivamente por: Luis Diego Álvarez Alfaro en su proyecto "Diseño e implementación de un sistema para el control de emisión de radiación" realizado en el año 2012 y por Erick Steven Rojas Lizano,

en una asistencia al profesor Mauricio Espinoza. Los elementos restantes se desarrollarán en este proyecto y serán explicados brevemente a continuación.

El módulo de seguridad, tiene como propósito que la fuente no pueda abrirse a menos que la puerta de la habitación esté cerrada. El de monitoreo, consiste en cámaras web para poder observar el funcionamiento del proceso de calibración. El de apertura o clausura total de la fuente, se conforma por un sistema que oculta o expone material radiactivo al ambiente. Por último, una interfaz para poder controlar todos estos subsistemas desde una computadora. La unión de todos los módulos mencionados, da como resultado, una interfaz capaz de controlar un sistema de calibración de equipo para medir radiación.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Diseñar una interfaz gráfica, para el control de un equipo para la calibración de medidores de radiación.

Objetivos específicos

Para el desarrollo de este proyecto se establecieron los siguientes objetivos:

- Analizar los sistemas de automatización existentes en el sistema de calibración de medidores de radiación.
- Evaluar las necesidades y requerimientos para el adecuado control del sistema de calibración.
- Agregar a los sistemas de control existentes los módulos necesarios para poder cumplir con las necesidades y requerimientos del sistema.
- Integrar los diferentes sistemas de automatización encontrados bajo una sola interfaz gráfica que permita al usuario centralizar el control del sistema.
- Evaluar el sistema centralizado de control para comprobar el adecuado funcionamiento según los requerimientos establecidos.
- Hacer un manual tanto de operación como de desarrollo que explique el uso de la interfaz y la programación de esta.

1.3 Metodología

El desarrollo del trabajo incluyó los siguientes pasos y procedimientos, listados en secuencia:

1. Revisión del sistema de calibración actual del CICANUM.
2. Revisión del proyecto de control de filtros y el de control de posición.
3. Configuración del Arduino Uno para poder utilizarlo como interfaz para adquisición de datos del programa $LabVIEW^{®}$.
4. Diseñar el módulo de encendido/apagado por medio de lógica combinacional.
5. Construir un circuito para poder simular la operación del módulo de encendido/apagado cumpliendo con los requisitos establecidos por el CICANUM.
6. Investigar la manera para ejecutar, desde $LabVIEW^{®}$, los programas encargados de manejar las cámaras y el láser para medición de distancia, respectivamente.
7. Juntar los trabajos existentes con el realizado en este proyecto bajo una misma interfaz gráfica en $LabVIEW^{®}$.
8. Lograr que el resultado final opere correctamente, con los sistemas diseñados funcionando en paralelo utilizando tres placas Arduino Uno.

2 Antecedentes

Para cumplir con los objetivos propuestos, es importante conocer el contexto teórico y práctico del sistema que se pretende automatizar. Entre los aspectos que se investigaron para el desarrollo de este proyecto están: Teoría sobre radiación, ya que el sistema bajo estudio es para calibrar medidores de la misma, la estructura y el funcionamiento del sistema de calibración actual, los requerimientos del procedimiento vigente y el aporte de los proyectos previos con el fin de automatizar este proceso.

2.1 Radiación

La radiación es un fenómeno físico en el cual, cierta cantidad de energía emana de un objeto. Dicha energía se manifiesta por medio de la liberación de ondas electromagnéticas o partículas alfa y beta (Villanueva, 2005). Se puede clasificar la radiación como ionizante o no ionizante. Al incidir sobre un objeto, la radiación ionizante, hace que electrones salgan de moléculas o átomos a los que pertenecían, alterando su composición normal. Por otro lado, la no ionizante, no tiene este efecto de alterar la estructura de la materia

Las fuentes principales de radiación ionizante vienen del espacio, de los elementos radioactivos pertenecientes a la tierra, o de materiales manipulados por el hombre con el fin de emitir radiación (ATSDR, 1999). La radiación proveniente del espacio, choca contra la atmósfera esparciendo los rayos que la componen. La que se origina en la Tierra, por elementos radioactivos, es poco común debido a que estos elementos no son muy abundantes. Finalmente la radiación en propósitos industriales o médicos, es la que puede exponer a ciertas personas a niveles mayores de radiación. La radiación ionizante va dejando un poco de energía en cada partícula con la que colisiona, por lo tanto en el ambiente encontramos diferentes niveles de radiación, a los cuales estamos expuestos.

La radiación no ionizante es un componente esencial de todos los sistemas basados en radiofrecuencia. Este tipo de sistemas incluyen radio, microondas y radiaciones ópticas (Villanueva, 2005). Al estar rodeados de antenas celulares y otros tipos de transmisiones inalámbricas, la gente está expuesta diariamente a la misma. Lo importante de ésta, es que es muy útil para el ser humano y es menos peligrosa que la ionizante.

Las radiaciones ionizantes pertenecen al rango del espectro electromagnético con longitudes de onda iguales o menores que 100 nm y frecuencias

mayores o iguales a 3×10^{15} Hz (Villanueva, 2005). Dentro de este ámbito se encuentran los rayos X y los rayos gamma, estos presentan los más altos niveles de energía del espectro electromagnético: los rayos gamma 20×10^{-15}J y los rayos X 20×10^{-18} J, dicha característica les permite ionizar la materia contra la cual chocan (Astrofísicayfísica, 2012).

Entre las aplicaciones que tienen estas radiaciones ionizantes, las más conocidas son las del campo de la medicina. Los rayos gamma, se utilizan en radioterapia para el tratamiento contra el cáncer. La fuente más común para este procedimiento es el Cobalto 60, la cual es un metal que produce este tipo de radiación al ser sacado de su estado natural, Cobalto 59 (Freijo, 2000). Por otro lado, los rayos X son famosos por brindar una herramienta de diagnóstico para los médicos. Al exponer un cuerpo a rayos X, el sistema óseo absorbe la mayoría de la radiación. El resto pasa a la placa sensible a los rayos X, formando una imagen del sistema óseo del cuerpo (Ojo-Científico, 2013).

Otros componentes de la radiación son las partículas alfa y las partículas beta. Estas ya no tienen el comportamiento de onda electromagnética, sino que está compuesta por los elementos discretos que fueron removidos del átomo original. Las partículas alfa son núcleos de Helio cargados positivamente, es decir dos neutrones y dos protones, por lo tanto tienen gran tamaño y gran energía. Debido a sus dimensiones, chocan con muchas partículas por lo que pierden su energía más rápido que las partículas beta, las cuales tienen un tamaño menor (Gil, 2013).

Las partículas beta pueden ser positivas o negativas, resultando en radiación beta positiva o radiación beta negativa. La primera ocurre cuando al transformar un protón en un neutrón y un positrón. El positrón es un electrón pero con carga positiva y es el que sale del átomo al producirse la reacción mencionada. La segunda sucede cuando un neutrón se transforma en un protón, al liberar un electrón. Dicho esto se sabe que las partículas beta tienen un tamaño muy pequeño, por lo tanto, es menos probable que colisionen con otras partículas y tienen mayor penetración que las partículas alfa (Pascual, 2013).

Medición de la radiación

Para medir la radiación se utilizan diferentes unidades, se usan tanto las tradicionales, como las del sistema internacional de medidas. Entre las tradicionales se encuentran el Roentgen, el rad y el rem. Por otro lado, en SI, se utilizan los Gray(Gy) y los Sievert (SV).

El Roentgen se utiliza para medir la exposición a la radiación, pero tiene limitaciones, como sólo detectar radiación ionizante de rayos X, o gamma, y sólo funciona en el aire. Un Roentgen crea una carga eléctrica de $2,58 \times 10^4$

Coulomb en un kilogramo de aire seco. El rad y el rem son medidas de dosis de radiación por unidad de materia.

Un rad es cuando un gramo de material, de cualquier tipo, absorbe 100 ergios. Un rem, es también una unidad de absorción de energía, o dosis de radiación, pero que se multiplica por un factor q, para analizar su efecto en los seres vivos. El factor q, depende del tipo de radiación que se esté midiendo. Para las radiaciones electromagnéticas, dicho factor vale 1, por lo que hay una equivalencia entre rem y rad.

En cuanto a las unidades SI, estas también hacen una diferencia entre la medición de dosis de radiación con la materia viva. El criterio mencionado hace proporcional el rad al Gray, para dosimetría en cualquier tipo de materia. La proporción utilizada es 1 Gray equivale a 100 rad. El Sievert, es la unidad designada para dosimetría en seres vivos, esta equivale a 100 rem (Gil, 2013).

El ser humano necesita de tecnología para poder detectar la radiación ionizante. Por lo tanto, resulta necesario detectarla y medirla en campos laborales que interactúen directamente con materiales radioactivos. Los dos métodos más comunes para detección de radiación ionizante, son la cámara gaseosa y los detectores de centelleo.

La técnica más común para detectar radiación es la cámara gaseosa. Está basada en el principio que la radiación tiene la capacidad de ionizar el aire o algún otro gas específico. Sabiendo que si hay radiación, hay iones en la cámara, se conectan electrodos a la misma. Luego se aplica una tensión eléctrica, de forma que los iones positivos se mueven hacia el cátodo y los iones negativos al ánodo. Este movimiento de iones va a crear un aumento en la diferencia de potencial entre los electrodos, la cual puede ser fácilmente medida con algún voltímetro. Entre mayor nivel de radiación haya, mayor será la diferencia de potencial entre los electrodos. Se muestra una ilustración del sistema descrito en la figura 2.1.

Otra técnica usualmente empleada son los detectores de centelleo. Estos se basan en la utilización de materiales que emiten una pequeña cantidad de luz, al entrar en contacto con la radiación. Típicamente se emplea el yoduro sódico. Al producir una luz, esta incide sobre un material conocido como fotocátodo. La característica más importante de este último, es que emite electrones al recibir cuantos de luz. Luego, por medio de una tensión, estos electrones pasan por placas llamadas dinodos, las que liberan más electrones al recibir el impacto de uno de ellos. Esta cadena va aumentando la cantidad de electrones, permitiendo dar como resultado la medición de una corriente proporcional a la radiación (Gil, 2013). Se muestra una ilustración del sistema descrito en la figura 2.2.

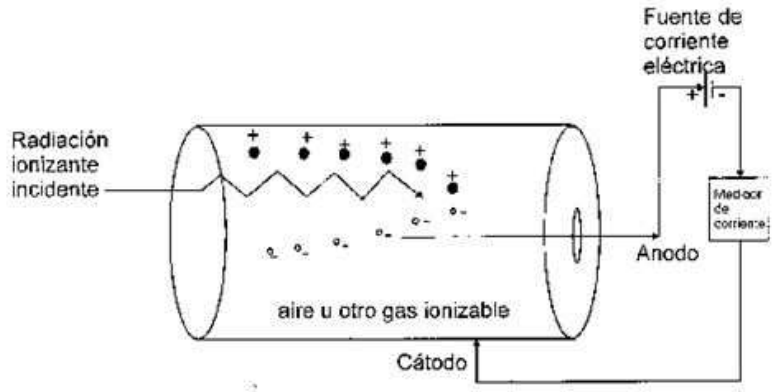


Figura 2.1: Medidor de cámara gaseosa (Gil, 2013)

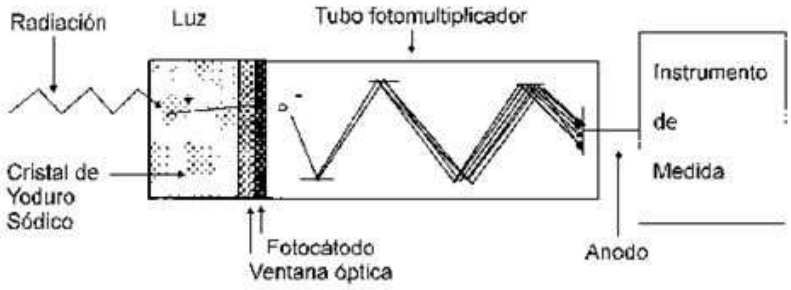


Figura 2.2: Medidor de centelleo (Gil, 2013)

Efectos dela radiación

Los efectos de la radiación ionizante pueden clasificarse de la siguiente manera (Villanueva, 2005):

1. Transmisión

    a) Somáticos: el individuo padecerá de los síntomas causados por la radiación.

    b) Genéticos: las células germinales del individuo fueron dañadas, por lo que sus descendientes serán los afectados por la radiación.

2. Incidencia

a) Deterministas: poseen un valor límite de células dañadas antes de que ocurra un efecto importante. Es decir que se pueden controlar y la gravedad de los mismos depende directamente de la dosis aplicada.

b) Estocásticos: pueden ocurrir o no, pero al aumentar la dosis de radiación aumenta la probabilidad de que sucedan, por ejemplo el cáncer.

En cuanto a los efectos deterministas, la exposición a radiación ionizante puede dañar varios tejidos, provocando diferentes daños e incluso la muerte. Si el daño es mayor al que el cuerpo puede reparar, entonces las células dañadas se dividirán, produciendo células defectuosas, que provocarían cáncer. Las células más sensibles son las que se reproducen más rápidamente, como las reproductivas y las más lentas las del sistema nervioso (Gil, 2013). Entre los tejidos y sistemas que pueden ser afectados se encuentran: sistema gastrointestinal, sistema hematopoyético, sistema nervioso central, testículos, ovarios, piel y tiroides. Si en cualquiera de estos se superan los límites de daños severos, llevaría a la muerte.

Existen niveles de dosis para asegurar que la radiación ionizante no dañe a las personas que trabajan con ella. Según las normas básicas de seguridad, establecidas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés), en un año se considera segura una dosis de 1 mSv, 5 mSv en casos especiales. El promedio de dosis por año de la gente es de menos de 1mSv (IAEA, 2013). La idea de estos niveles es evitar daños a corto y a largo plazo. Para lograrlo, la gente expuesta tiene que estar protegida óptimamente y la fuente tiene que ser revisada para asegurar que es segura. En Costa Rica, el Centro de Investigación de Ciencias Atómicas Nucleares y Moleculares (CICANUM), es el encargado de la dosimetría del personal expuesto a radiaciones ionizantes. Este laboratorio está acreditado con la norma ISO 17025, la cual certifica la calidad del trabajo que se realiza (INTECO, 2013).

Isótopo Cesio 137

El Cesio es un elemento químico que en su estado natural es estable, se le conoce como cesio 133. Existen dos isótopos radioactivos del cesio: el cesio 137 y el Cesio 134. La diferencia principal es que la vida media del cesio 137 es aproximadamente treinta años, mientras que la del Cesio 134 es de cerca de dos años. Es poco probable que el cesio estable afecte la salud de las personas, por otro lado el cesio radioactivo puede causar variedad de daños. Entre las consecuencias de exposición a radiación ionizante se encuentran: náusea, vómito, diarrea, hemorragias, coma e incluso la muerte.

2.2 Sistema existente para calibrar medidores de radiación

Estructura actual del sistema

El sistema está conformado por módulos manuales de medición, atenuación de intensidad y de apertura de la fuente. Todo esto está montado sobre un riel. La medición se hace con cinta métrica, desde la fuente hasta donde se ubica el sensor. La variación de la intensidad, se hace colocando los filtros de plomo deseados frente a la apertura de la fuente. La apertura de la fuente, se hace elevando o bajando el Cesio por medio de un tornillo sin fin, sujeto a una plataforma sobre la cual está el Cesio. Se considera abierta, cuando el Cesio llega al nivel de un agujero, en el tubo que se encuentra subiendo o bajando la plataforma.

Figura 2.3: Fuente de radiación

En la figura 2.3 se puede observar la fuente de radiación, la cual se abre o cierra por medio del tornillo sin fin que también se muestra en la fotografía. También se puede notar en la imagen, cómo el sistema está montado sobre un riel. Otro aspecto importante de la figura, es que se puede ver el motor DC y los sensores de final de carrera, pero estos no están operando actualmente. Los ovalos rojos señalan los sensores de contacto y el cuadrado azul el motor

DC.

Figura 2.4: Vista lateral de la plataforma de medición

En la figura 2.4, se puede ver el sistema de medición manual por medio de una cinta métrica y un señalador adherido a la plataforma. También se nota cómo la plataforma tiene ruedas para desplazarse a lo largo del riel.

Figura 2.5: Vista superior de la plataforma de medición

En la figura 2.5 se tiene una vista superior de la plataforma sobre la cual se monta el sensor de radiación para ser calibrado. En esta imagen también se

nota la cámara para monitorear un medidor analógico de radiación colocado sobre la plataforma.

Requerimientos del sistema

Se necesita automatizar los módulos para trabajar de forma más eficiente. La automatización del equipo, pretende controlar todo bajo una interfaz creada por $LabVIEW^{®}$. Además, se necesita un sistema de seguridad que no permita la apertura de la fuente de radiactiva, si la puerta de la habitación se encuentra abierta. También se necesita un sistema de cámaras para monitorear el sistema, una vez que esté automatizado.

Filtros de atenuación y control cartesiano

En trabajos efectuados en semestres anteriores se diseñaron sistemas automáticos para la atenuación de la intensidad y para el control cartesiano de la posición del medidor. Estos todavía no han sido agregados al sistema actual. El propósito del sistema de atenuación, es que el personal no tenga que cambiar manualmente los filtros de plomo, para variar la intensidad de la radiación. El fin del sistema de control cartesiano, es controlar la posición de la plataforma en el riel, sobre la cual se monta el sensor de radiación.

El sistema de control de filtros fue hecho por Luis Diego Álvarez Alfaro, en su proyecto "Diseño e implementación de un sistema para el control de emisión de radiación" realizado en el año 2012. Este proyecto consiste en una interfaz gráfica diseñada en $LabVIEW^{®}$, con el fin de lograr cambiar los filtros por medio del movimiento de un motor a pasos.

El trabajo para realizar el control de posición cartesiana de la plataforma, lo realizó Erick Steven Rojas Lizano. Se realizó en una asistencia al profesor Mauricio Espinoza. Consiste en una interfaz diseñada en $LabVIEW^{®}$ para controlar por medio de sensores y motores DC, el movimiento y la posición de la plataforma de medición del sistema.

3 Desarrollo

Debido a que el Arduino Uno se va a utilizar como medio para adquisición de datos, es importante recordar instalarle el software para poder trabajar con él desde $LabVIEW^{®}$. El objetivo es poder emitir y recibir señales, a través del Arduino Uno, para controlar el sistema que se desea automatizar desde una interfaz gráfica.

3.1 Diseño del módulo de encendido/apagado

Se analizó el sistema para observar cómo funciona actualmente. Basado en las observaciones realizadas, se procedió a buscar un método para controlar la operación del mismo. La solución implementada fue la lógica combinacional. Dicha lógica permitió analizar todas las posibles combinaciones de las entradas al sistema y determinar qué salida se necesitaba para cada situación. Las entradas y salidas del sistema son las siguientes:

Entradas:

- Sensor de contacto de la puerta (SCP).
- Sensor de contacto superior (SCS).
- Sensor de contacto inferior (SCI).
- Señal de control para solicitar el encendido o apagado de la fuente (A).

Salidas:

- Señal de control para manipular la polaridad de la tensión que le llega al motor (G).
- Señal de control para habilitar o deshabilitar el motor para encender o apagar la fuente.

En la figura 3.1 se observa la tabla de verdad construida para representar todas las combinaciones posibles de las entradas. De tal forma, se logra visualizar las 16 situaciones que podrían ocurrir en la operación del sistema. Se toma que los sensores de contacto son uno cuando un elemento los toca. La señal A se interpreta como 1 cuando se le solicita al sistema que encienda la fuente y 0 cuando se le solicita que la apague. Cuando la señal EN está en 1

Term	SCP	A	SCS	SCI	=>	EN	G
0	0	0	0	0		1	0
1	0	0	0	1		0	1
2	0	0	1	0		1	0
3	0	0	1	1		X	0
4	0	1	0	0		1	0
5	0	1	0	1		0	1
6	0	1	1	0		1	0
7	0	1	1	1		X	0
8	1	0	0	0		1	0
9	1	0	0	1		0	1
10	1	0	1	0		1	0
11	1	0	1	1		X	0
12	1	1	0	0		1	1
13	1	1	0	1		1	1
14	1	1	1	0		0	0
15	1	1	1	1		X	1

Figura 3.1: Tabla de la verdad del sistema bajo estudio

habilita el motor, si no se deshabilita. Al tener un valor de 1, la señal de G está haciendo que al motor le lleguen 24V y este gire para abrir la fuente. En caso de que la señal G tenga un valor de 0, el motor recibirá -24V y girará en el sentido contrario, moviéndose para cerrar la fuente. De los 16 casos posibles, hay 4 que no son posibles: el 3, el 7, el 11 y el 15. La situación que hace que no sea posible, es que el SCS y el SCI no van a estar con un valor de uno al mismo tiempo. Eso implicaría que la fuente esté encendida y apagada al mismo tiempo. Para considerar que la fuente está encendida, el motor debe girar el tornillo sin fin hasta que la plataforma, sobre la cual se encuentra el material radioactivo, llegue al tope superior, quedando el material expuesto al ambiente. Por otro lado para considerar que la fuente está apagada, el motor tuvo que haber girado el tornillo sin fin, en sentido opuesto, hasta que la plataforma llegara al tope inferior, aislando el material del ambiente.

De la figura 3.1 se puede analizar los 12 casos restantes. Se puede observar en la figura 3.2 los 4 casos en los que se divide el sistema en general. A su vez cada caso de los mencionados se va a dividir en cuatro situaciones más, las cuales son iguales para cada una de las cuatro circunstancias descritas en el esquema.

En cada caso van a haber cuatro combinaciones posibles entre SCS y SCI, una de las cuales, como se mencionó previamente no se va a dar y es cuando ambos están en 1 al mismo tiempo. La explicación de esto es que la fuente no puede estar arriba y abajo al mismo tiempo. Los tres casos restantes para

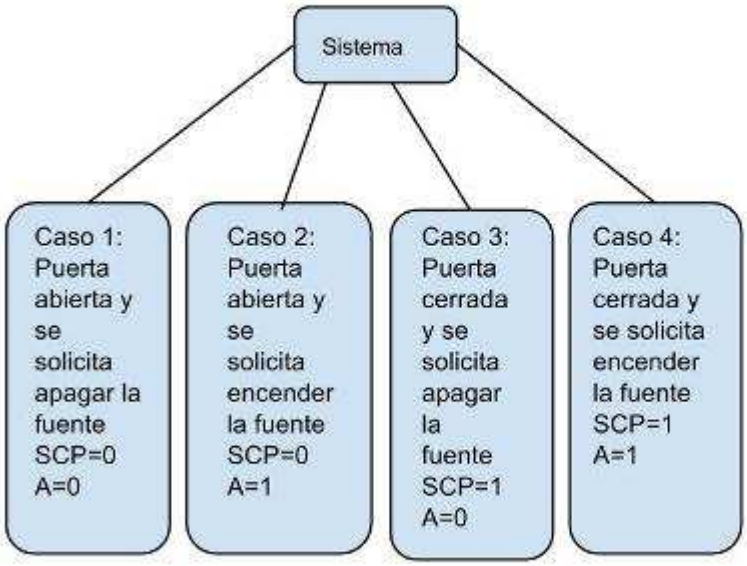

Sistema
Caso 1: Puerta abierta y se solicita apagar la fuente SCP=0 A=0
Caso 2: Puerta abierta y se solicita encender la fuente SCP=0 A=1
Caso 3: Puerta cerrada y se solicita apagar la fuente SCP=1 A=0
Caso 4: Puerta cerrada y se solicita encender la fuente SCP=1 A=1

Figura 3.2: Esquema de los cuatro casos generales del sistema

cuando la fuente está encendida, para cuando está apagada y para cuando la plataforma no está en ninguno de los dos extremos del tubo por el cual sube y baja. Las subdivisiones mencionadas se ilustran en la figura 3.3.

Lo que se refiere a los estados de las salidas, EN y G, estas se definen dependiendo del caso general y la subdivisión del mismo en que se encuentren. Cada combinación entre casos y subcasos lleva a una situación en particular, ante la cual el sistema tiene que responder conforme a los requisitos establecidos. Para el caso 1, el caso 2 y el caso 3, las salidas van a tener el mismo comportamiento en todos los subcasos. Lo anterior se da porque en el caso 1 y el caso 2, la puerta está abierta (SCP=0), por lo tanto la fuente no debería encenderse. En otras palabras se le va a solicitar a la fuente que se apague. En el caso 3, ya la puerta se encuentra cerrada (SCP=1), pero se le está solicitando a la fuente apagarse (A=0). Cada uno de los casos es una situación que requiere que el motor se habilite o deshabilite y que gire en un sentido o

en otro.

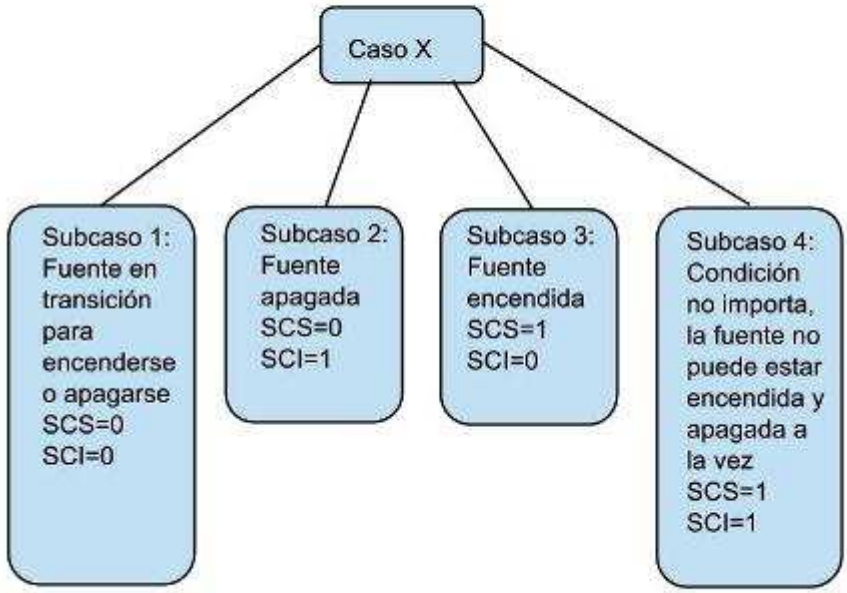

Caso X
Subcaso 1: Fuente en transición para encenderse o apagarse SCS=0 SCI=0
Subcaso 2: Fuente apagada SCS=0 SCI=1
Subcaso 3: Fuente encendida SCS=1 SCI=0
Subcaso 4: Condición no importa, la fuente no puede estar encendida y apagada a la vez SCS=1 SCI=1

Figura 3.3: Esquema de las subdivisiones de casos generales

A continuación se explica cada uno de los subcasos en detalle:

- En el subcaso 1: la fuente se encuentra en una transición, puede ser para encenderse si está en el caso 4 o para apagare en cualquiera de los demás. Dada esta condición se necesita que el motor esté habilitado (EN=1) y girando para apagar (G=0) o encender (G=1) la plataforma.

- En el subcaso 2: La fuente está apagada, ubicada en el fondo del tubo que contiene la plataforma. Para el caso 1, el caso 2 y el caso 3, la plataforma estaba bajando y ya llegó al fondo, por lo tanto se apagó. Al darse este momento se tiene que deshabilitar el motor (EN=0) para que detenga la plataforma. Para cuando ocurre en el caso 4, la fuente estaba apagada pero ahora se le está solicitando encenderse. En otras palabras, se tiene

que habilitar el motor (EN=1) y hacerlo girar para subir la plataforma (G=1).

- En el subcaso 3: La fuente está encendida, es decir en el tope superior del tubo, expuesta al ambiente. Bajo las condiciones del caso 1, el caso 2 y el caso 3, se le solicita a la fuente apagarse, por lo que el motor se debe habilitar (EN=1) y hacerlo girar para descender la plataforma (G=0). Dado el caso 4, la fuente ya está encendida y no puede seguir subiendo la plataforma, por lo que el motor se deshabilita (EN=0).
- En el subcaso 4: Es una condición que implicaría que la fuente esté encendida y apagada al mismo tiempo, lo cual no puede suceder.

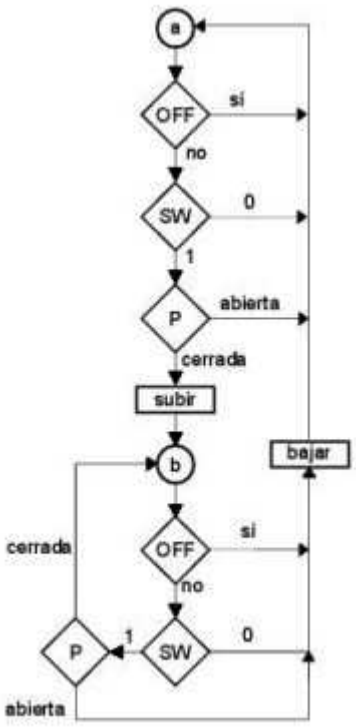


Figura 3.4: Diagrama ASM

En la figura 3.4 se observa el diagrama de ASM del sistema. Tiene dos estados, el estado a es cerrado y el estado b es abierto. Cuenta con tres entradas: switch (SW), puerta (P) y apagar (OFF). La entrada SW es la misma que la señal A que solicita que la plataforma suba o baje. Las salidas del sistema son subir y bajar, que corresponde a girar en un sentido o en otro el motor DC.

Finalmente, se busca la manera de implementar la lógica combinacional diseñada por medio de compuertas lógicas. Para realizarlo se utilizó el programa *LogicFriday*®, al cual se le introduce una tabla de verdad y este tiene la capacidad de entregar el equivalente en compuertas lógicas. De esta manera se llegó a la configuración que se muestra en la figura 3.5.

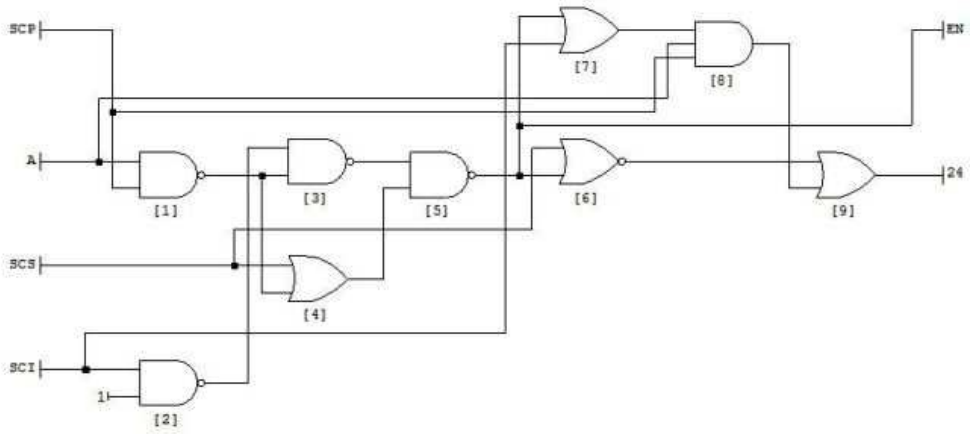


Figura 3.5: Lógica combinacional implementada

Esta configuración se implementó en *LabVIEW*® para manejar las señales lógicas emitidas y recibidas por el Arduino, para cumplir con el modo de funcionamiento requerido.

3.2 Circuito para probar el funcionamiento del módulo diseñado

Una vez terminada la etapa de desarrollo de la lógica combinacional, con la cual se haría funcionar el sistema, se necesita un hardware para simular el proceso real. Para resolver esta situación, se diseñó un circuito capaz de emular las condiciones de operación especificadas por el personal del CICANUM.

Las condiciones que debía poder reproducir el circuito mencionado son:

- El estado de la fuente, si encendida o apagada.
- El giro en las dos direcciones del motor DC.
- El estado, abierto o cerrado, de la puerta de la habitación en la cual está el sistema de calibración.

Para simular estas condiciones se utilizan, un módulo de interruptores, el Arduino y un módulo para el control del motor. Este último, integrado por

un bloque de inversores y otro bloque de un puente H. El módulo de interruptores, se conecta haciendo mallas simples para cada interruptor y colocando resistencias para no cortocircuitar la señal cuando se cierre el interruptor. En este caso se utilizaron resistencias de 1 kΩ.

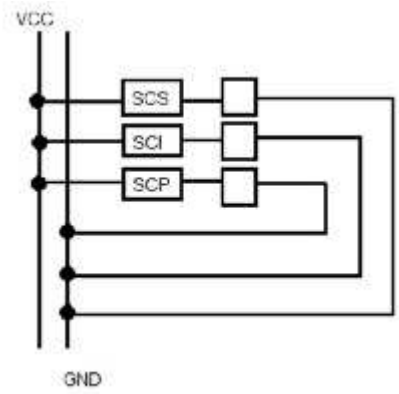


Figura 3.6: Módulo de interruptores

En la figura 3.6, se ilustra lo explicado anteriormente. Los interruptores van a servir para simular los sensores de contacto del sistema real. La entrada al Arduino, para cada uno de los sensores, va a salir del nodo entre el sensor respectivo y la caja blanca que simboliza la resistencia. De esta forma si el sensor se encuentra abierto, se va a tener un cero lógico en la entrada.

Si el sensor se cierra, la entrada quedaría conectada a VCC la cual equivale a un uno lógico. La información de cada entrada se procesa en la lógica combinacional, con el fin de controlar el sistema de la forma propuesta. La tensión VCC es la que se obtiene de la salida de 5V del Arduino. La referencia GND, también se obtiene del Arduino y posteriormente será conectada a la tierra de la fuente DC, para tener la misma referencia en todo el circuito.

El módulo de encendido y apagado de la fuente utiliza cinco pines del Arduino para entradas y salidas lógicas. Además usa la salida de 5V y la tierra GND, que la tarjeta puede suministrar. La figura 3.7 ilustra la conexión del Arduino. La conexión y los nombres de cada señal en los pines lógicos de la tarjeta son las siguientes:

- Pin 9: es la salida llamada G, y se usa para controlar el sentido de giro del motor, dependiendo si es uno o cero. Esta señal va conectada al módulo de inversores para poder tener el valor real y el negado.

- Pin 10: Es la entrada que representa el sensor de contacto de la puerta (SCP).

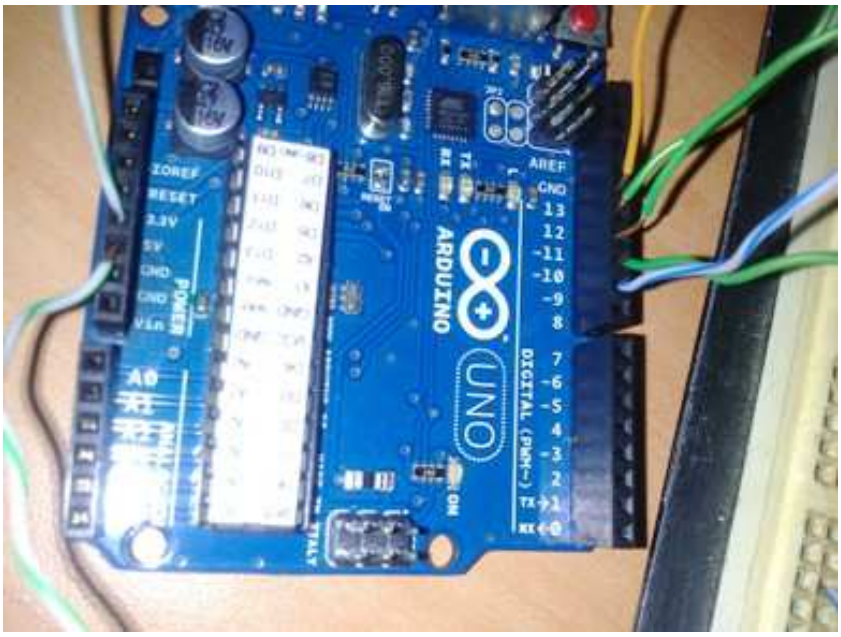


Figura 3.7: Conexión del Arduino

- Pin 11: Es la entrada que representa el sensor de contacto superior de la fuente (SCS).
- Pin 12: Es la entrada que representa el sensor de contacto inferior de la fuente (SCI).
- Pin 13: Es la salida llamada EN y va conectada al puente H para habilitar o deshabilitar le motor.

Como se mencionó anteriormente, la señal G se usó para controlar el sentido de giro del motor. Para esto fue necesario un integrado DM7405N, compuesto de varios inversores, de los cuales se utilizaron dos. En la figura 3.8, se muestra la conexión de este módulo. La señal G, el cable azul, entra por la primera patilla del integrado, sacando en la segunda su negado. La segunda patilla se cortocircuita con la tercera, este es la entrada a otro inversor que vuelve a mandar la señal G real en la patilla 4.

Entonces de las patillas dos y cuatro se sacan respectivamente: un 10, cuando G=0 y un 01, cuando G=1. La primera combinación es la definida para hacer girar el motor de manera que encienda la fuente. La restante es la que lo hace girar en la dirección contraria para apagarlo. Las patillas mencionadas van a ir conectadas a los pines int 3 e int 4 del puente H, por medio de los cables verdes que se observan en la figura 3.8. La señal G negada, se conecta a

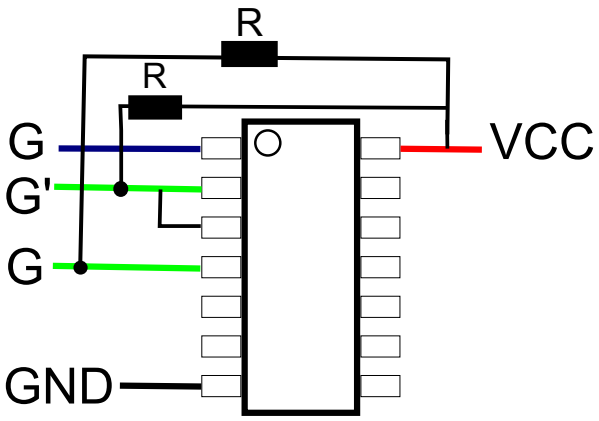


Figura 3.8: Módulo de inversores

int 4 (o a int 2) y la señal G se conecta a int 3 (o int 1). El integrado DM7405N es alimentado por medio de VCC, el cable rojo en la patilla 14, y GND, el cable negro en la patilla 7, ambas señales proporcionadas por el Arduino. También se observan las resistencias de 1 kΩ como resistencia de "pull up".

El puente H sirve para controlar el sentido de giro de un motor, por medio de dos señales, derivadas de una señal de control, llamada en este caso "G". El puente H es el elemento que conecta el Arduino con el motor. Es el que alimenta el motor y puede cambiar la polaridad de la alimentación que se le da al mismo. Precisamente es este cambio de polaridad en la alimentación lo que define el sentido de giro del motor DC. La figura 3.9 muestra el puente H conectado. Como se mencionó previamente, las señales complementarias de las patillas 2 y 4, conectadas a los pines int 4, el cable amarillo, e int 3, el anaranjado, van conectados al puente H. Estas definen el sentido de giro.

La señal de habilitación o deshabilitación del motor (EN), va conectada al pin "Enable" del puente H por medio del cable verde que se observa en la figura 3.9. Este pin habilita o deshabilita la circuitería TTL que se encarga de polarizar de una u otra forma la salida del puente H. Se debe alimentar el puente H, aproximadamente con la tensión que se desea suministrar al motor. En este caso, como el objetivo era encender LEDs, se suministró una tensión de 5V, suficiente para polarizar los diodos. Las salidas de tensión del puente H, son los cables color café y café con blanco, en la parte inferior de la pantalla. Estos cables alimentarán el módulo de LEDs.

Para manifestar visualmente el sentido de giro que tendría el motor o si estaba detenido se usaron LEDs. Un LED verde para indicar que el motor está levantando la plataforma, es decir encendiendo la fuente. Un LED rojo para indicar que el motor está girando en el sentido opuesto, para apagar la fuente de radiación. En caso de que ninguno de los LEDs se encuentre encendido, es

Figura 3.9: Conexión del puente H

porque el motor está deshabilitado, esta situación se da cuando la fuente está completamente encendida o apagada. La conexión de este módulo se muestra en la figura 3.10. Se puede ver el cable café y el café con blanco, que son la alimentación que se entregaría al motor. En este caso la tensión suministrada sirve para encender uno de los dos LEDs a la vez, ya que están conectados de forma antiparalela. El trimmer que se observa es para regular la corriente, la cual es 40 mA ya que la tensión es 2 V en los diodos y el trimmer está ajustado a 50 Ω.

3.3 Interfaz del sistema de encendido y apagado de la fuente

La lógica para diseñar el sistema de encendido y apagado de la fuente de radiación ya fue descrita previamente. En esta sección se describe la interfaz creada y la función de cada uno de sus elementos. Con el fin de poder comprobar los estados de las señales manejadas por las entradas y salidas del Arduino, se colocaron indicadores de las mismas. En la figura 3.11 se puede observar que en la parte inferior izquierda de la imagen, se encuentran casillas para desplegar el estado lógico de cada señal. El cuadro etiquetado como positivo, es el de la señal de salida llamada G. La luz etiquetada ENABLE, muestra el estado de la salida EN. El resto de las casillas son las entradas al sistema.

En la parte superior izquierda de la figura 3.11, se encuentra el cuadro que

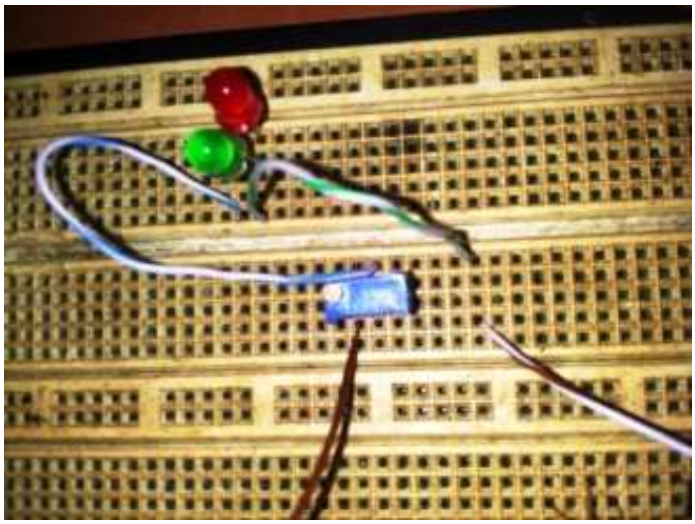


Figura 3.10: LEDs del sistema para encendido y apagado

brinda la opción de escoger el puerto que se va a utilizar. Para saber cuál escoger, se busca en la carpeta de "Dispositivos e Impresoras" si la computadora ya detectó el Arduino y ahí se muestra el puerto en el que está conectado. Al hacer clic en la flecha de este cuadro se despliegan los puertos posibles para elegir, en caso de que se tenga más de un Arduino disponible.

La sección inferior derecha tiene el propósito de correr archivos ejecutables desde $LabVIEW^{®}$. Es decir que este bloque inicia el programa que se le especifique. Para este proyecto se necesita accionar el programa para manejo de las cámaras USB y para controlar el láser, el cual se va a utilizar para hacer mediciones. Para seleccionar el programa que se desea ejecutar, se le da clic al ícono de la carpeta y este abre el "Explorador de Windows". Una vez abierto el explorador, se busca la ubicación del archivo ejecutable deseado y se selecciona. El camino hasta el archivo se despliega en la casilla, como se observa en la imagen 3.11.

El recuadro de la sección superior derecha de la figura 3.11, es el bloque encargado del encendido/apagado de la fuente. Además en este bloque se encuentra el botón "STOP" el cual es el que detiene la ejecución del programa en $LabVIEW^{®}$. La figura 3.12 muestra un acercamiento del bloque encargado de encender y apagar la fuente.

El usuario ejerce el control por medio de el interruptor "Subir/Bajar". Dicho interruptor consta de dos posiciones: la superior para encender y la inferior para apagar la fuente de radiación. Si se desea encender la fuente, se pone el interruptor en la posición superior. Si se desea apagar la fuente, se coloca el interruptor en la posición inferior. En caso de que el sistema esté

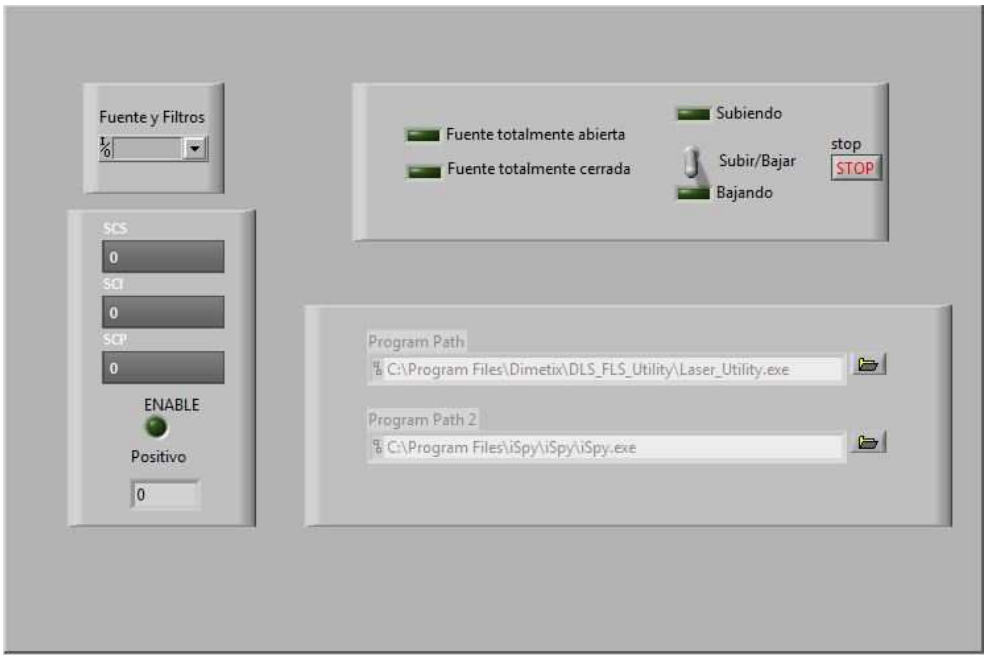


Figura 3.11: Interfaz del sistema de encendido/apagado con indicadores y el sistema de ejecución de programas alternos

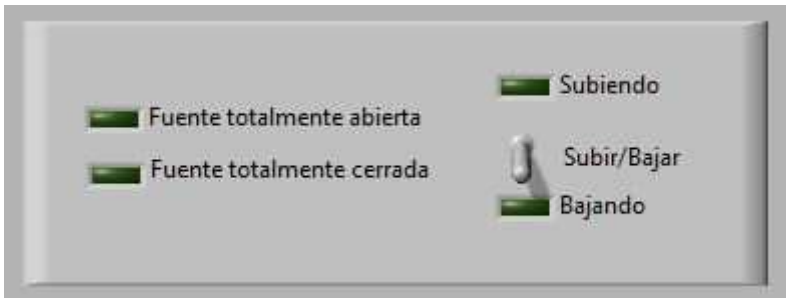


Figura 3.12: Interfaz del sistema de encendido y apagado de la fuente

trabajando para encender la fuente, la luz de "Subiendo" se iluminará. De estar trabajando para apagarla, se iluminará la luz "Bajando". Por último, una vez que la plataforma sobre la cual se encuentra el material radioactivo, llegó al tope superior o al inferior, se enciende la luz de "Fuente totalmente abierta" o "Fuente totalmente cerrada" respectivamente.

Es importante mencionar que el sistema de encendido y apagado cuenta con una rutina para apagar totalmente la fuente al detener el programa. En caso de que se detenga la ejecución del programa y la fuente se encuentre

parcial o totalmente abierta, el programa se encargará de bajar la plataforma hasta el tope inferior, es decir apagar la fuente completamente. Para indicar que la fuente está parcial o totalmente abierta, se utiliza una luz grande en la interfaz. Es la luz de forma circular más grande de la interfaz. En la sección 6 de la interfaz se puede ver la luz mencionada. Esta luz se pone en rojo si la fuente está parcial o totalmente abierta. Al estar completamente cerrada, se pone en verde.

3.4 Interfaz del sistema completo

Una vez que se logró, que tanto el sistema de encendido y apagado, como el de ejecución de programas alternos, funcionaran de la manera deseada, se procedió a unir lo realizado en los proyectos anteriores. Para poder ejecutar los tres proyectos paralelamente, se creó una interfaz que los colocara en un mismo programa de $LabVIEW^{®}$. Este programa tiene la capacidad de manejar tres Arduinos independientemente, es decir, cada Arduino maneja un proyecto, de los tres realizados. Además, se altera ligeramente el código de cada proyecto, para poder detener el programa general con un sólo botón, en lugar de tener que detener los sistemas individualmente. En la figura 3.13 se observa el resultado final de la interfaz gráfica construida.

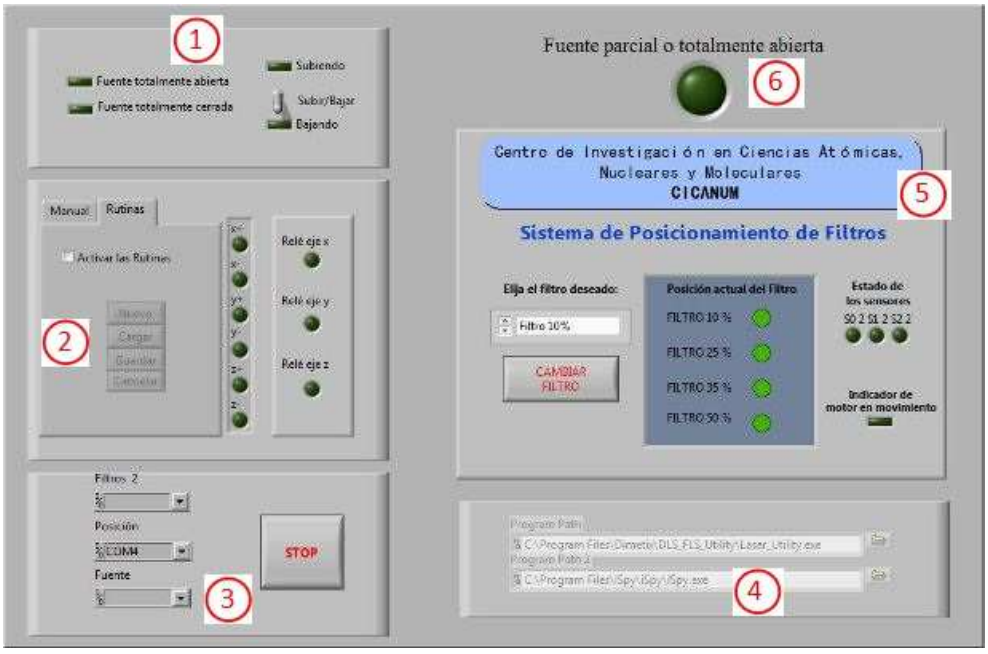


Figura 3.13: Interfaz del sistema completo

A continuación, se hace una descripción de cada bloque de la interfaz general. Los bloques 1 y 4 ya fueron descritos en la sección anterior, ya que son parte del aporte que se hizo en este proyecto. Los bloques a los que se hace referencia son el de control de encendido y apagado de la fuente de radiación, y el ejecución de programas alternos desde $LabVIEW^{®}$.

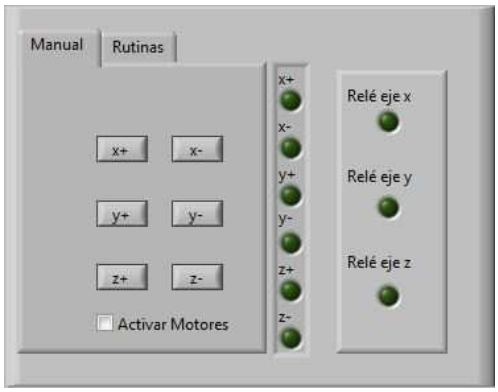


Figura 3.14: Sección del sistema de posicionamiento

El bloque 2 en la figura 3.13, es el encargado del control de posición cartesiana del sistema. En la figura 3.14 se observa más detalladamente dicho bloque. Entre las muchas luces indicadoras, las de la columna en el costado derecho de la imagen, son las que indican cuándo la plataforma está en su posición inicial. Al ejecutar este bloque, se le pregunta al usuario si desea llevar la plataforma a su posición inicial. De dar clic en aceptar el bloque movería los motores hasta que, en la práctica, hicieran contacto con el inicio del riel. De seleccionar la opción cancelar, se dejaría la plataforma dónde estaba. Este bloque presenta dos pestañas, una llamada "Rutinas" y otra llamada "Manual". En manual se puede controlar el movimiento de los motores. Al hacer clic en cualquiera de los botones, se activaría la luz del mismo nombre, indicando que se está moviendo la plataforma en la dirección elegida. El movimiento se da mientras el botón esté activado. Si el motor estuviera en la posición inicial los valores con signo negativo quedarían deshabilitados ya que físicamente el avance de la plataforma estaría limitado.

La pestaña "Rutinas", se observa en la figura 3.15. Sirve para especificarle al sistema la posición a la que se quiere llevar la plataforma y que este vaya hacia ella. Ambas pestañas tienen una caja para seleccionar y marcar por medio de un check, si se desea trabajar con una modalidad u otra. También da la opción hacer, guardar, cargar o cancelar rutinas.

Al hacer clic en "Nuevo" se abre la imagen de la figura 3.16. En esta se puede elegir un punto en cada eje. Una vez que se introdujo la coordenada

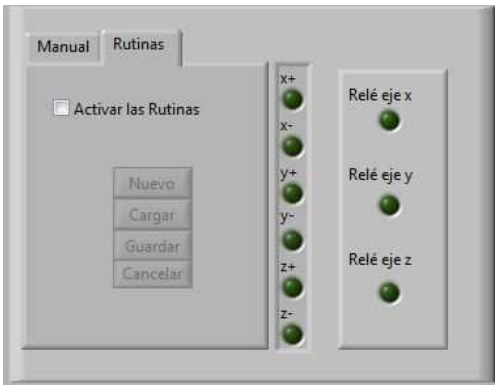


Figura 3.15: Inferfaz de la pestaña Rutinas

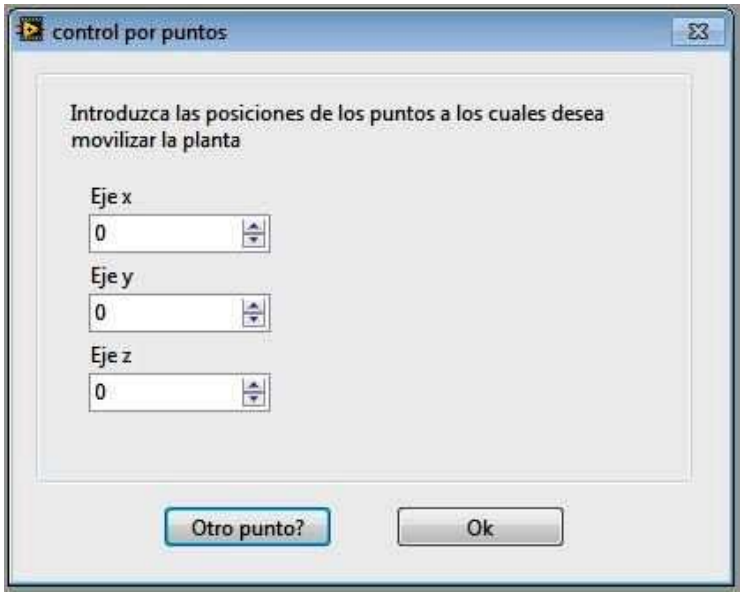


Figura 3.16: Ventana para especificar puntos

se tienen dos opciones: activar el botón "Otro punto?" o "OK". El primero permite introducir la siguiente coordenada en la rutina, que termina siendo una secuencia de puntos. El segundo cierra la ventana y lleva la plataforma al punto especificado. Cuando se da clic en "Cargar", se abre el "Explorador de Windows" para poder buscar un archivo ".tex" o ".lvm" en el cual haya una rutina previamente creada. Al activar el botón "Guardar", se guarda la rutina actual. Si se hace clic en "Cancelar" se cancela la ejecución de la rutina actual.

Los bloques que se observan en la figura 3.17, son el de selección de puertos

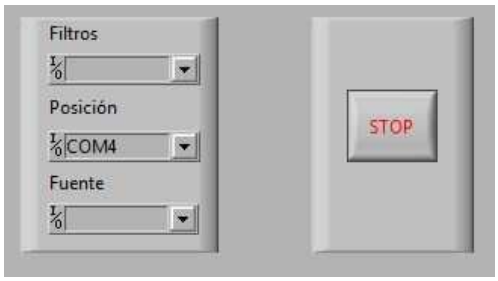


Figura 3.17: Sección del sistema de selección de puertos y detener el programa

Figura 3.18: Sección del sistema de selección de filtros

y el de detener la ejecución del programa. Dado que en este caso se trabaja con tres Arduinos, hay que volverse a fijar en cuál puerto se encuentra instalado cada uno antes de ejecutar el programa. Se observa claramente la etiqueta que hace referencia a cada proyecto. En cada casilla se desplegará el puerto elegido.

El bloque 5 de la figura 3.13 es el de control de filtros, consta de tres secciones. En la figura 3.18 se puede ver un acercamiento del bloque mencionado. De izquierda a derecha, las tres secciones son:

- Unidad de selección de filtro: Se tienen cuatro opciones. Estas se eligen haciendo clic en las flechas para subir o bajar el porcentaje. Luego se le da clic al botón “CAMBIAR FILTRO” y este acciona el sistema para llegar al filtro seleccionado.

- La unidad de notificación de filtro: Se encarga de informar al usuario cuál

filtro se está usando. Esto se hace encendiendo la luz correspondiente al filtro que se esté usando.

- Unidad de aviso de estado de motor: se encarga de informar al usuario si el motor está en movimiento para colocar los filtros en la posición deseada o no. Es un LED cuadrado en la parte inferior de la columna derecha de elementos.

- Unidad de notificación de sensores: este avisa al usuario, el estado de los sensores infrarrojos S0, S1 y S2, encargados de informar sobre la posición de los filtros mientras se están acomodando.

3.5 Validación del sistema

El funcionamiento adecuado de la interfaz diseñada, se comprobó construyendo circuitos eléctricos que simularan la operación real del sistema para calibración de medidores de radiación. Dado que la interfaz final consiste en la unión de tres proyectos separados, se pretende verificar la operación correcta de cada uno al estar funcionando paralelamente. Cada uno de estos circuitos debía mostrar físicamente el cumplimiento de los requisitos para los que se diseñó cada proyecto.

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Automática de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica. El programa $LabVIEW^{®}$ fue utilizado en una computadora personal con Windows 7.

Para el circuito de encendido y apagado de la fuente, se usaron LEDs para indicar el movimiento hacia arriba o hacia abajo de la plataforma. El LED verde indicaba que la fuente estaba encendiéndose y el rojo que estaba apagándose. El hecho de que se encontrara alguno de los LEDs encendidos, implicaba que el motor se estaba moviendo en una u otra dirección, es decir que estaba habilitado. En caso de que la fuente estuviera totalmente encendida o apagada, ninguno de los LEDs debía estar encendido, ya que en estos casos el motor DC debía detenerse. Estos LEDs eran alimentados por la salida del puente H, que era el que alimentaba los motores con tensión positiva o negativa, dependiendo de la dirección de giro deseada. La figura 3.19 muestra el circuito descrito.

El objetivo del sistema de posicionamiento también era mover motores, por lo que también se emplearon LEDs para representar el movimiento de los motors. Estos al igual que en el sistema para encendido y apagado de la fuente, se conectaron en las salidas de los puentes H para notificar el estado de los motores DC. En este caso las luces rojas indican movimiento hacia direcciones positivas y las verdes hacia direcciones negativas. Si las luces estaban apagadas,

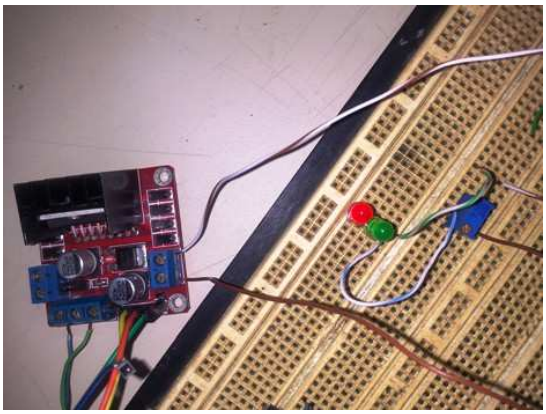


Figura 3.19: Circuito de validación del sistema de encendido y apagado

indicaban que ninguno de los motores se estaba moviendo. En la figura 3.20 se muestra el circuito implementado.

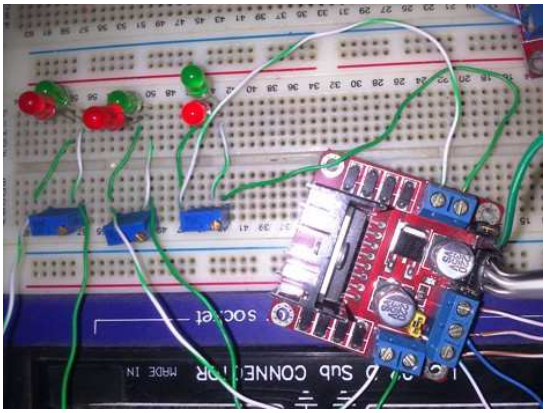


Figura 3.20: Circuito para validación del sistema de posicionamiento

Respecto al sistema de control de filtros, había que emular la lectura del código de cada filtro y el movimiento de los motores. Para el movimiento de los motores se utilizó el mismo sistema de LEDs conectados a las salidas del puente H, las cuales simulaban la alimentación del motor a pasos. La función de lectura se simuló añadiendo señales internas al programa original. Estas fueron agregadas por medio de una O lógica para no afectar el funcionamiento del código original y que funcionara aunque en realidad no hubiera un sistema de lectura en el circuito de prueba. Estas señales serían interruptores virtuales para enviar unos y ceros lógicos, los cuales representaban las lecturas de tres bits correspondientes a cada filtro. Debido a que el movimiento del motor

se controla por medio de combinaciones de pulsos de cuatro bits, se colocaron LEDs para poder observarlas. En la figura 3.21 se puede ver el circuito mencionado.

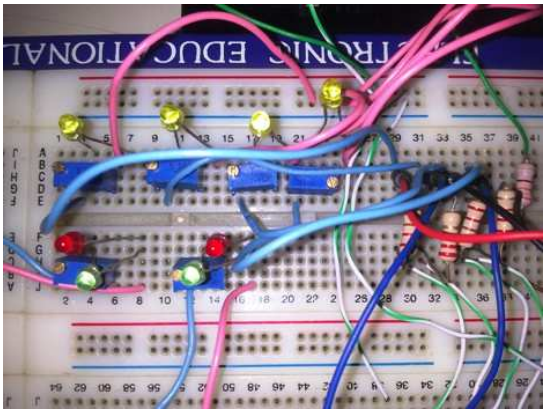


Figura 3.21: Circuito para validación del sistema de control de filtros

Por medio de los circuitos construidos, se logró comprobar el funcionamiento de los sistemas operando simultáneamente y bajo una misma interfaz. El sistema de encendido y apagado cumplió con requisitos especificados por el CICANUM. Estos eran: el monitoreo del sistema por medio de cámaras USB , la medición por láser y la condición de seguridad respecto a la puerta de la habitación en la que se encuentra el sistema. Además se logró comprobar la rutina de apagado de la fuente una vez que se detiene la ejecución del programa. El circuito de comprobación para el sistema de posicionamiento también demostró la correcta operación del mismo. Se logró observar por medio de los LEDs, como el programa controlaba la polaridad de la alimentación que le llegaba a los motores DC. Lo que implicaba que el programa sí lograba controlar el sentido de giro de los motores. También se logró comprobar que el programa detectaba correctamente, cuando el carrito sobre el cual se coloca el medidor de radiación, se encontraba en la posición inicial, o no.

El circuito de prueba para el sistema de control de filtros, logró verificar que el sistema funcionaba correctamente. Se observó que el sistema lograba ubicar los filtros en la posición inicial y que lograba mover los motores hasta llegar al filtro seleccionado. La alimentación de los motores se logró verificar por medio de los LEDs instalados. Al igual que la visualización de las secuencias de cuatro bits para controlar el movimiento de los motores.

4 Conclusiones y recomendaciones

Por medio del trabajo realizado para la culminación de este proyecto se llegó a lo siguiente.

Conclusiones

- Se logró programar en $LabVIEW^{®}$ una interfaz para gráfica para controlar el sistema para calibración de medidores de radiación.
- Se pudo realizar un programa en $LabVIEW^{®}$ para controlar el encendido y apagado de la fuente por medio de una interfaz gráfica.
- Se consiguió acoplar los proyectos existentes con el aporte hecho en este proyecto bajo una sola interfaz.
- Se logró diseñar circuitos para comprobar la operación correcta, tanto de cada proyecto por separado, como del sistema completo.

Recomendaciones

A la hora de implementar el diseño de automatización, usar "printed circuit boards" (PCB) para reducir el espacio que ocupa una tabla de prototipos y facilitar la conexión del mismo. Esto haría más confiables el sistema los circuitos, ya que reduce la posibilidad de errores al armar los circuitos. Se recomienda el uso del programa PCB Wizard para este propósito.

Bibliografía

Astrofísicayfísica (2012). *¿Qué es espectro electromagnético?* http://www.astrofisicayfisica.com/2012/06/que-es-el-espectro-electromagnetico.html.

ATSDR (1999). *RADIACIÓN IONIZANTE*. http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts149.pdf.

CICANUM (2013). *CICANUM*. http://cicanum.ucr.ac.cr/.

Freijo, J. (2000). *La radiación gamma y sus aplicaciones*. http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=154.

Gil, J. (2013). *Principios de Urgencias, Emergencias y Cuidados Críticos*. http://tratado.uninet.edu/c0901i.html.

IAEA (2013). *Radiation Safety*. http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Radiation/radsafe.html..

INTECO (2013). *LA NORMA INTE-ISO 17025:2005 Y SUS IMPLICACIONES*. http://www.inteco.or.cr/doc/Capacitaci\%C3\%B3n/CONTENIDO\%20DE\%20CURSOS/LA\%20NORMA\%20INTE-17025\%20INTECO.pdf.

Ojo-Científico (2013). *¿Para qué sirven los rayos X?* http://www.ojocientifico.com/2011/03/28/para-que-sirven-los-rayos-x.

Pascual, A. (2013). *Radiaciones ionizantes: normas de protección*. http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_304.pdf.

Villanueva, J. (2005). *RIESGOS TECNOLÓGICOS*. http://es.scribd.com/doc/79020835/40/RADIACIONES-IONIZANTES-DEFINICION-Y-TIPOS\#page=33.

A Manual de usuario e instrucciones de conexión del sistema de posicionamiento y del sistema de encendido y apagado de la fuente

Para poder utilizar el instrumento virtual es necesario configurar cada Arduino para que logre comunicarse con $LabVIEW^{®}$. En los puntos siguientes se encuentran las instrucciones para lograrlo. Se debe seguir el orden numérico de los puntos para instalar los programas.

1. Conectar el Arduino a la computadora `http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/0F9DADF9055B086D86257841005D1773?OpenDocument`
2. Instalar los controladores o "drivers" del NI-VISA. `http://joule.ni.com/nidu/cds/view/p/id/2251/lang/en`
3. Instalar el JKI VI Package Manager (VIPM) Community Edition (Free) `http://www.jki.net/vipm`
4. Cargar el Firmware de la interfaz de $LabVIEW^{®}$ para Arduino como se ve en`http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/8C07747189606D148625789C005C2DD6?OpenDocument`
5. Descargar e instalar el software para el uso del láser de medición del link: `http://www.dimetix.com/UtilitySW/`
6. Para manejar las cámaras USB se utilizó el programa gratuito de vigilancia iSpy. Este se puede descargar e instalar desde el link: `http://www.ispyconnect.com/download.aspx`

Para realizar este proyecto se usó $LabVIEW^{®}$ 2013. La computadora en la que se trabajó fue: Gateway serie M-6816. Esta viene con un procesador intel Centrino Duo, de doble núcleo 1.5 GHz y 2 G de RAM. Tiene 3 puertos USB. Dependiendo del número de cámaras que se quiera usar, se necesitará usar uno o más hubs para tener más puertos USB disponibles.

Cuadro A.1: Lista de componentes para el proyecto completo

Componente	Modelo	Cantidad	Valor	Sistema
Microcontrolador	Arduino UNO	3		1 por sistema
Cable USB		3		1 por sistema
Optoacoples	PC817	4		Filtros
Resistencias		4	220 Ω 1/4W	Filtros
Resistencias		4	330 Ω 1/4W	Filtros
Resistencias		3	47 Ω 1/2 W	Filtros
Resistencias		3	6.8 kΩ 1/4 W	Filtros
Resistencias		5	1 kΩ	On/Off
Diodo IRED	Radio Shack 276-143	3		Filtros
Fototransistor	NTE3034A	3		Filtros
Módulo Puentes H	L298	3		Todos
Motor DC		4		On/Off y Posic.
Motor a Pasos		1		Filtros
Sensor de contacto		6		On/Off y Posioc.
Módulo de inversores	DM7405N	1		On/Off

Se necesita un total de: 3 Arduinos, uno para cada sistema y un mínimo de 3 puentes H del tipo L298. Cada puente tiene dos salidas, por lo que se dispone de 6 salidas para alimentar motores. El sistema de encendido y apagado de la fuente sólo necesita una salida, el de control de posicionamiento cartesiano necesita 3 salidas y el sistema de control de filtros necesita 2 salidas.

Se requieren 6 sensores de contacto, 3 para el sistema de posicionamiento y 3 para el de encendido y apagado de la fuente. En el apéndice de conexión se detalla la ubicación de todos estos elementos. La tabla A.1 muestra los componentes necesarios para armar el proyecto completo.

A.1 Manual para el uso de la interfaz gráfica

Para ejecutar el programa se debe abrir el documento Pruebafinal.vi de $LabVIEW^{®}$ y una vez abierto, hacer clic al botón “Run”. El botón tiene un ícono que es una flecha, señalando hacia la derecha. Al ejecutar este programa van a ocurrir los siguientes eventos:

- Se abre automáticamente el software llamado “Laser Utility” del láser para poder hacer las mediciones con este dispositivo.

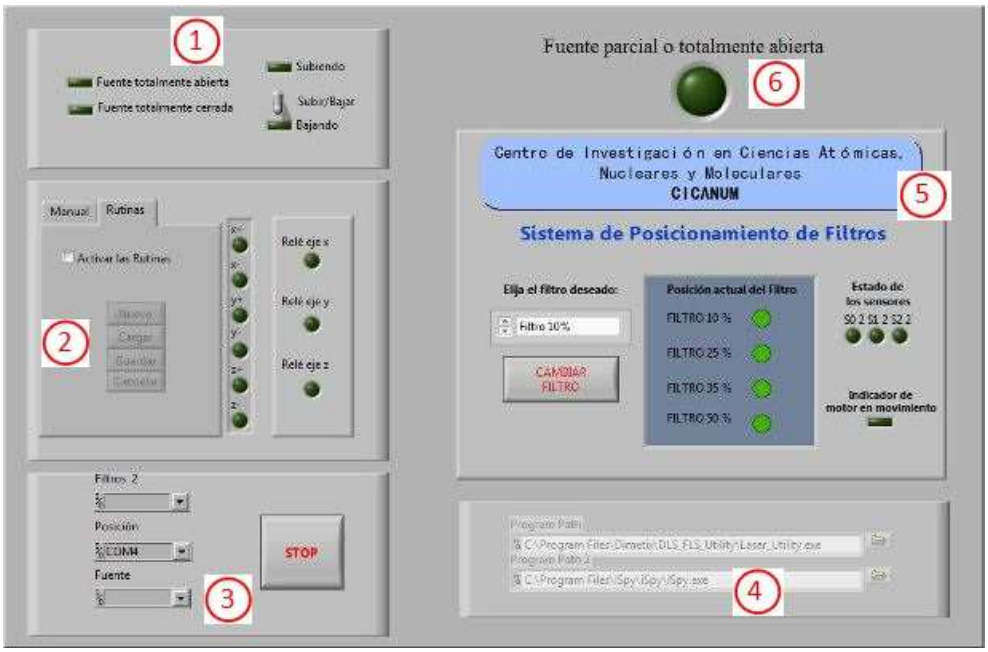


Figura A.1: Interfaz del sistema completo

- Se abre automáticamente el software llamado "iSpy" para poder monitorear el sistema por medio de cámaras USB.

- El sistema de posicionamiento despliega un mensaje en el que le pregunta al usuario si desea mover los motores a la posición inicial. Si se hace clic en "Sí", los motores se acomoda en dicha posición. Si se da clic en "No", el sistema cerrará el mensaje y no hará nada.

- El sistema de control de filtros despliega un mensaje en el que le pregunta al usuario si desea empezar el ajuste de filtro. Eso quiere decir que si desea llevar los filtros a la posición inicial, es decir con el filtro de 10 % colocado frente a la fuente. Si se le da clic a "ACEPTAR' se llevará a cabo esta acción. Si se le da clic a "CANCELAR" el sistema no hará nada.

Una vez que se ejecutaron las acciones iniciales se puede empezar a usar la interfaz libremente. Esta se puede observar más detalladamente y con sus bloques numerados en la figura A.1.

- Bloque 1: Consta de cuatro indicadores y un interruptor de dos posiciones. Si se coloca en la posición superior inicia el movimiento para

encender la fuente, si se coloca en la posición inferior inicia el movimiento para apagar la fuente. Los indicadores señalan, como lo indica el nombre de cada uno, si la fuente está completamente abierta o cerrada y si los motores están subiendo o bajando la plataforma sobre la cual se encuentra el material radioactivo.

- Bloque 2: Tiene dos opciones para operar, "Manual" o "Rutina". Se selecciona la opción haciendo clic en la pestaña con el nombre del modo de operación que se desea usar. El modo rutina se observa en la figura A.1, mientras que el modo manual se observa en la figura A.2.

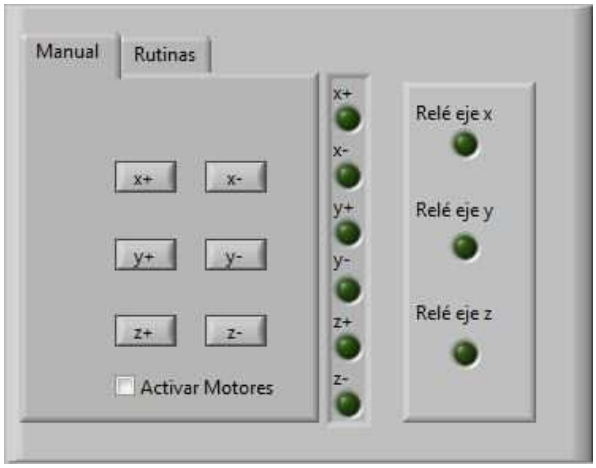


Figura A.2: Interfaz de modo manual

El modo manual tiene la opción de activar los motores y moverlos en direcciones positivas o negativas de cada eje. Este se activa haciendo clic en la casilla "Activar motores". La columna seis con seis luces en la figura A.2 indica el movimiento en cada una de las direcciones posibles. La columna de tres luces, indica si ya llegó a la posición inicial de cada eje.

El modo rutina se activa haciendo clic en la casilla "Activar las Rutinas". Este modo tiene cuatro botones: Nuevo, Cargar, Guardar y Cancelar.

  - Nuevo: sirve para crear una rutina, especificando una secuencia de puntos a seguir. Al hacer clic en este botón se abre la ventana de la figura A.3. En esta ventana se introduce la coordenada deseada y se le hace clic a "Otro punto?" para añadir la siguiente coordenada. Una vez que introdujeron los puntos deseados se le da clic a "OK", la ventana se cierra y el programa empieza a ejecutar la rutina, moviendo la plataforma a la posición deseada.

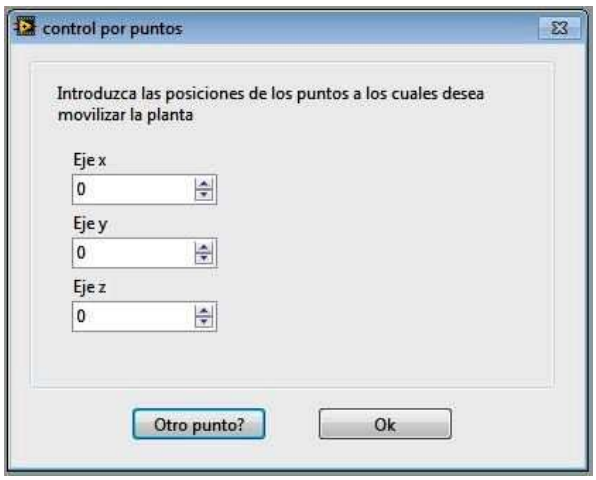


Figura A.3: Ventana para introducir puntos

  - Cargar: sirve para abrir una rutina que se había creado previamente en una archivo ".lvm" o ".txt".
  - Guardar: sirve para guardar la rutina que se está usando en un archivo".lvm".
  - Cancelar: sirve para detener la ejecución de la rutina que esté activa. Estas Rutinas lo que hacen es ir a un punto especifico x,y,z.

- Bloque 3: Tiene el botón de "STOP" y tres "combobox" que sirven para elegir el puerto "COM" para leer cada sistema. Dado que se necesitan tres Arduinos, se van a usar 3 puertos COM. El botón "STOP", sirve para detener la ejecución del programa.

- Bloque 4: Este tiene la opción de elegir el programa que se desea ejecutar. Se puede arrancar dos programas utilizando este bloque. Para abrir un programa se le da clic a la carpeta y se busca el archivo ejecutable del programa deseado. En este caso los programas elegidos son para poder monitorear el sistema con cámaras USB y para poder usar el láser para medir. Una vez que el programa de $LabVIEW^{®}$ se está ejecutando no se puede cambiar la elección del programa que se quiere abrir. Es decir que una vez que el usuario ejecuta el programa en $LabVIEW^{®}$ este bloque se deshabilita.

- Bloque 5: El sistema de control de filtros funciona seleccionando el filtro deseado y haciendo clic en "CAMBIAR FILTRO". Esto hace que el sistema coloque el filtro seleccionado frente a la fuente. Este bloque tiene

indicadores para informar cuál filtro se encuentra trabajando actualmente y la lectura de los sensores que sirven para reconocer cuál filtro tienen enfrente.

- Bloque 6: Este bloque no es controlado por el usuario, es un indicador del estado de la fuente. Se pone color rojo cuando la fuente no está completamente cerrada.

A.2 Conexión del sistema

El sistema completo está constituido por tres proyectos: el de encendido y apagado de la fuente (2), el de control de filtros (1) y el de control de posición (3). Cada uno de ellos tiene un circuito conectado a su respectivo Arduino, para poder operar paralelamente. En la figura A.4 se observa un diagrama general de la conexión de los tres sistemas. Los números entre paréntesis corresponden a esta figura.

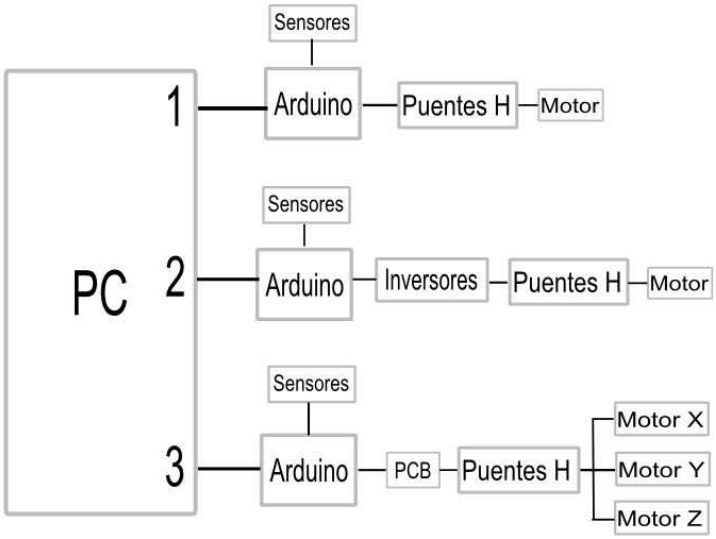


Figura A.4: Esquema de conexión general

Sistema de encendido y apagado

Este sistema consta de cinco bloques: Los 3 sensores de contacto, el Arduino, un puente H, los 2 inversores y el motor. Los sensores, los inversores y el puente H se conectan al Arduino. Este va a recibir entradas de los sensores y va a

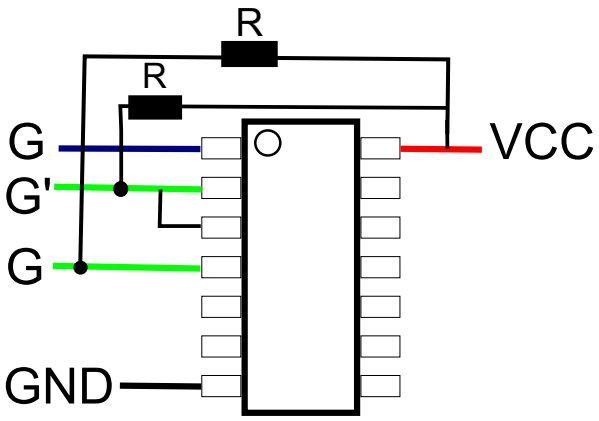


Figura A.5: Módulo de inversores

enviar señales al puente H para controlar el motor. Únicamente se necesita una salida de las dos que ofrece el integrado del puente H porque sólo se requiere movimiento en un eje.

Los sensores de contacto se tienen que ubicar, correspondientemente en la puerta del laboratorio, en la parte inferior de la fuente y en la parte superior de la misma. Esto suma un total de 3 sensores de contacto para este sistema.

La conexión del Arduino es la siguiente:

- Pin 9: la señal de salida "G" que controla la dirección de giro del motor.
- Pin 10: la señal de entrada del sensor de contacto de la puerta.
- Pin 11: la señal de entrada del sensor de contacto superior de la fuente.
- Pin 12: la señal de entrada del sensor de contacto inferior de la fuente.
- Pin 13: la señal de salida "EN" que habilita o deshabilita el motor.

La señal "EN" se conecta directamente al pin de control del puente H. Puede ser en "ENA" o en "ENB", depende del lado del puente H que se esté usando. Al "ENA" le corresponden "IN1" e "IN2", mientras que a "ENB" le corresponden "IN3" e "IN4".

La señal "G" se conecta a la etapa de inversores. En esta etapa la señal se niega y se vuelve a negar, teniendo como salidas la señal negada y la señal original. En la figura A.5 se muestra la conexión de esta utilizando un integrado compuesto de varios inversores, llamado DM7405N.

Las patillas dos y cuatro se sacan respectivamente: un 10, cuando G=0 y un 01, cuando G=1. La primera combinación es la definida para hacer girar el motor de manera que encienda la fuente. La restante es la que lo hace

girar en la dirección contraria para apagarlo. Las patillas mencionadas van a ir conectadas a los pines "IN3" e "IN4" del puente H, por medio de los cables verdes que se observan en la figura A.5. La señal G negada, se conecta a "IN4" (o a "IN2") y la señal G se conecta a "IN3" (o "IN1"). El integrado DM7405N es alimentado por medio de VCC, el cable rojo en la patilla 14, y GND, el cable negro en la patilla 7, ambas señales proporcionadas por el Arduino. También se observan las resistencias de 1 kΩ como resistencia de "pull up".

Las señales "IN1"o "IN3" e "IN2" o "IN4", dependiendo del lado en uso, se conectan al puente H en los pines que llevan los mismos nombres. El puente H debe ser alimentado con tensión DC, suficiente para hacer girar el motor. En este proyecto se usó una alimentación de 20V DC. El motor se conecta a la salida correspondiente al lado del puente H que se esté usando.

Sistema de posicionamiento

Este sistema está formado de cinco partes: Sensores de contacto, el Arduino, la PCB, los puentes H y los motores.

En la figura A.6 se puede observar la PCB desde el lado de los componentes, es decir el lado opuesto al del soldador, debido a esto la escritura se ve invertida.

Los sensores se ubican en lo que se defina como posición inicial de la plataforma donde se coloca el medidor de radiación. Luego se conectan al PCB en los pines denominados FCX, FCY y FCZ, ubicados en la parte superior derecha de la figura. Estas iniciales se deben a que indican el fin de carrera de cada uno de los ejes respectivos. Por lo tanto se necesitan 3 sensores de contacto para este sistema. El los pines del Arduino también se deben conectar a la PCB. Al lado izquierdo de la imagen es donde se conectan los pines. En la figura es ve un número 2 invertido, de este pin hacia abajo se van a conectar del 2 al 7, los 6 pines ordenados de forma consecutiva. Luego donde hay un número 10 invertido se va a empezar a conectar hacia arriba el pin 11, el 12, y el 13. La alimentación del Arduino se conecta al tercer pin de arriba hacia abajo en la imagen y la tierra al segundo de abajo hacia arriba en esa misma figura.

Seguidamente se conecta el puente H a la PCB. Para hacerlo se conectan la tierra del puente H con el pin GND que se observa en el costado derecho de la figura. Luego se conectan los 12V DC que alimentan el puente H con el pin 12V de la PCB. También hay que conectar los 5V DC que salen del Arduino con el pin de 5V de la PCB. Una vez hecho esto se terminó de conectar el bloque de alimentación del puente H con el de la PCB. Es importante mencionar que este circuito esta optoacoplado para proteger el Arduino y demás componentes.

Finalmente las salidas de los puentes H se conectan a los motores. Se necesitan dos puentes H para implementar este sistema. Un puente H L298

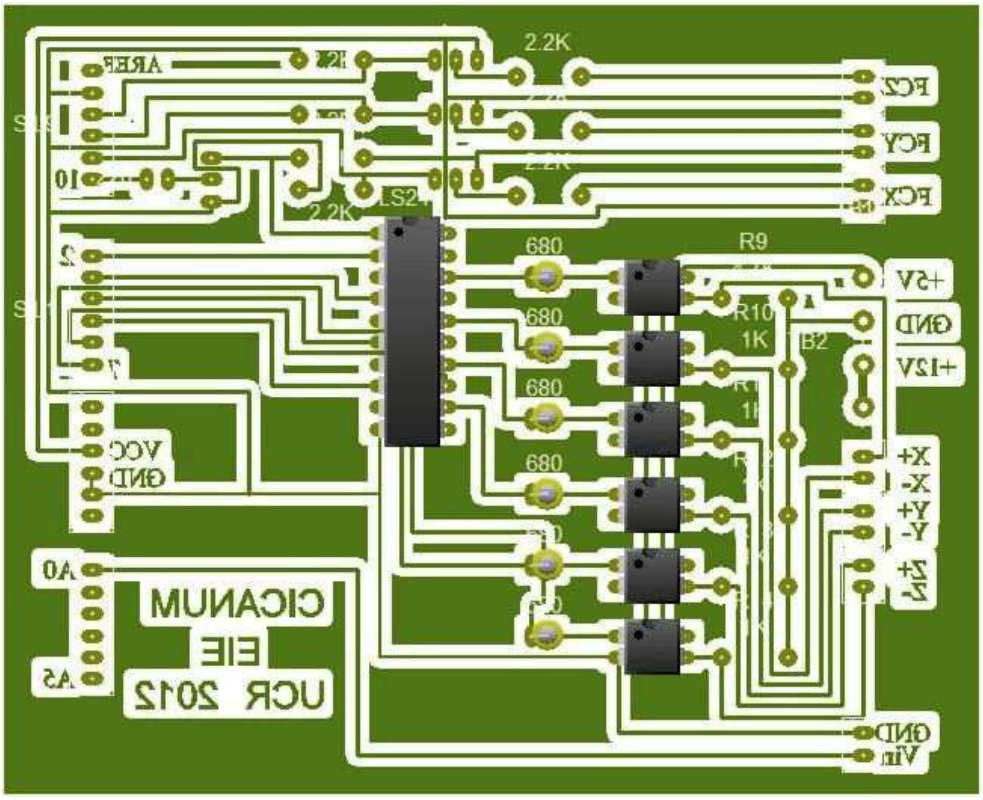


Figura A.6: PCB del sistema de posicionamiento visto desde el lado opuesto al del soldador

posee dos salidas, por lo que se usa uno completo y una salida del otro puente H. Esto se debe a que se necesita una salida par cada eje.

Sistema de control de filtros

Para ver los detalles de la conexión de este sistema, se adjunta el manual de usuario de la interfaz y las instrucciones de conexión del hardware del proyecto de Luis Diego Álvarez Alfaro "Diseño e implementación de un sistema para el control de emisión de radiación" realizado en el año 2012.

B Manual de usuario e instrucciones de conexión del hardware para el sistema de control de filtros

B.1 Instrucciones de conexión del hardware

Cuadro B.1: Características del motor seleccionado

Componente	Modelo	Cantidad	Valor
Microcontrolador	Arduino UNO	1	
Cable USB		1	
Optoacoples	PC817	4	
Resistencias		4	220 Ω 1/4W
Resistencias		4	330 Ω 1/4W
Resistencias		3	47 Ω 1/2 W
Resistencias		3	6.8 kΩ1/4 W
Diodo IRED	Radio Shack 276-143	3	
Fototransistor	NTE3034A	3	
Módulo Puentes H	L298	1	
Motor a Pasos		1	

En este sistema hay que conectar tres partes: el motor, los optoacopladores y los sensores infrarojos. La conexión de cada uno se detalla a continuación.

Conexión del Motor

Advertencia:
Al conectar un motor paso a paso con el Módulo de Puente H L298, asegúrese de que la fuente de alimentación del motor está apagada. Aisle cualquier conductor no usado del motor, de modo que él no se pueda poner en cortocircuito. Nunca desconecte el motor mientras que el accionamiento esté energizado. Nunca conecte los conductores del motor a la tierra o a una fuente de alimentación.

De acuerdo a la conexión del número de cables terminales del motor paso a paso, estos se dividen en los de 4 cables y 6 cables. Asegúrese de conocer cada una de estas y guíese por las siguientes instrucciones:

Motores de 4 conductores:
Los motores de 4 conductores, o bipolares, pueden ser conectados solamente de una forma. Siga el diagrama de cableado mostrado en la figura B.1.

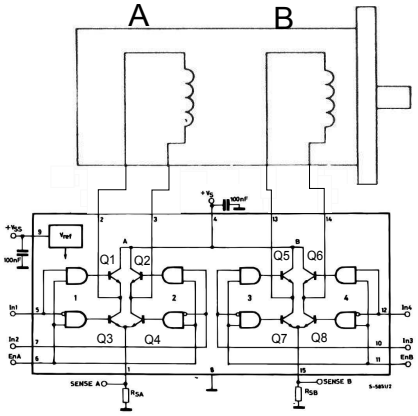


Figura B.1: Conexión del L298 con el motor a pasos bipolar

Motores de 6 conductores: Los motores de 6 conductores, figura B.2 o unipolares, se pueden conectar en serie con el cable central desconectado. En modo en serie, los motores producen más torque en velocidades bajas, pero no pueden funcionar tan rápidamente. En la operación en serie, el motor se debe hacer funcionar con corriente menor que la nominal en un 30 % para evitar calentamiento. El diagrama eléctrico este método de conexión es el mismo que se muestra en la figura B.1.

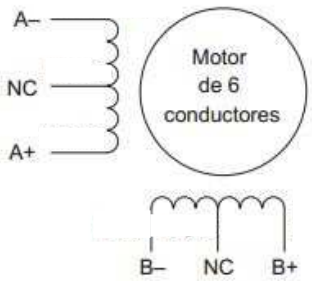


Figura B.2: Motor de 6 conductores

Conexión optoacopladores

En la figura B.3 se muestra el esquemático de este circuito, su conexión con el Arduino y el módulo de L298. Su implementación en una *protoboard*, usada en el proyecto, se muestra en la figura B.4.

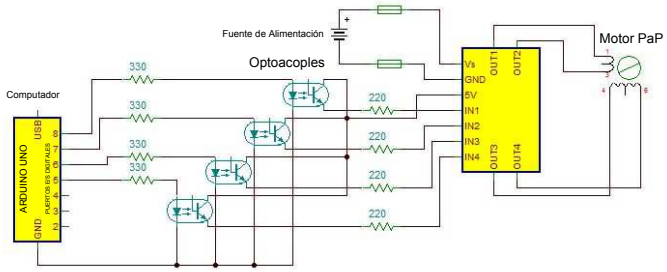


Figura B.3: Esquemático de la interfaz de optoacoples

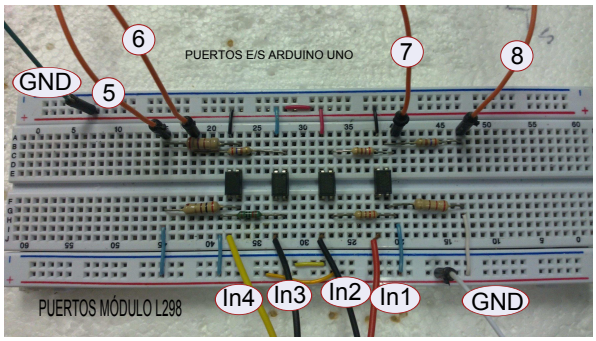


Figura B.4: Implementación en una *protoboard* de la interfaz de optoacoples

Conexión sensores infrarrojos

La conexión de cada uno de los optoacoples se realiza según el esquemático de la figura B.5, en la figura B.6 se muestra su implementación en una *protoboard*, como la usada en el proyecto. Recordar que el disco debe colocarse con el lado de las marcas frente al sensor a menos de 0.5 cm de este.

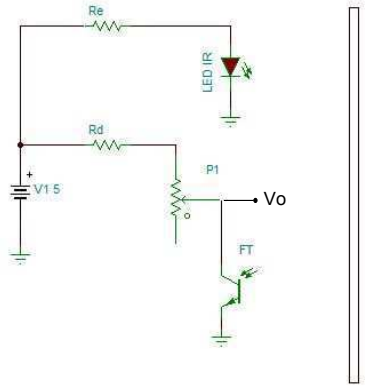


Figura B.5: Esquemático de un optoacople del sensor infrarrojo

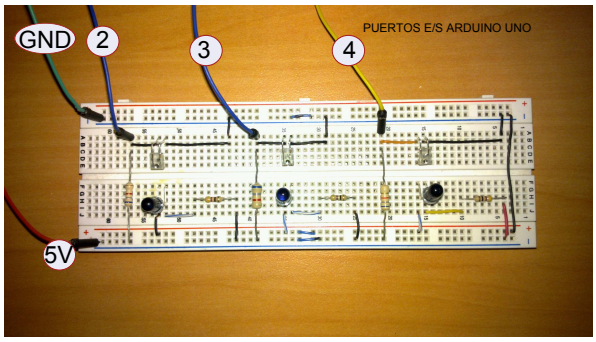


Figura B.6: Implementación en una *protoboard* de los sensores

B.2 Manual de usuario

Dimensionamiento del motor a pasos

El torque que requiere ser suministrado por el sistema de accionamiento al actuador, el motor a pasos, debe ser mayor que el torque resistivo de la carga, este se puede determinar como la suma del torque de aceleración y del torque resistivo a velocidad constante, se recomienda aplicar al motor un factor de seguridad entre 20 a 100 %, dependiendo del sistema, para evitar que el motor deje de ejecutar pulsos o se pare por cambios de carga, ya que hay varios efectos difíciles de cuantificar, tal como la velocidad del lubricante, desgaste del actuador, entre otros.

La fórmula para el torque mínimo que el motor debe suministrar es:

$$T_{motor} = T_{acel} + T_{resist} \tag{B.1}$$

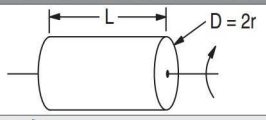
Donde T_{acel} es el torque que requiere la carga para acelerar y desacelerar la inercia total del sistema (inercia incluyendo la del motor y del actuador). Y T_{resist} es el torque de carga a velocidad constante para hacer funcionar el mecanismo, vencer la fricción, y fuerzas externas de carga, etc. El torque requerido para acelerar o desacelerar una carga con inercia con un cambio lineal de velocidad es:

$$T_{acel}[N.m] = J_{total}[kg.m^2] \cdot (\Delta_{velocidad}[RPM]/\Delta_{tiempo}[s]) \cdot 2\pi/60 \qquad \text{(B.2)}$$

J_{total} es la inercia del motor más la inercia de la carga (reflejada al eje del motor en caso de usar un sistema de engranajes). El factor $2\pi/60$ es usado para convertir el cambio en velocidad, expresada en RPM, a una velocidad angular (radianes/segundo).

Como se describió en el desarrollo del proyecto, el motor PaP se encargará de mover un disco de acero que contiene los filtros, en el cuadro B.2 se muestran los cálculos necesarios para calcular el momento de inercia de este cuerpo, que básicamente es un cilindro muy delgado. Es importante recordar

Cuadro B.2: Fórmulas del cilindro

Fórmulas de determinación de inercia de cilindro sólido	
	
Descripción:	**Fórmulas:**
Inercia	**J** {Kg-m²] = **(Peso** [Kg] * **r²**[m]) ÷ **2**
Inercia	**J** [Kg-m²] = (**π** * **L** [m]* **ρ** [Kg/m³] * **r⁴**[m]) ÷ **2**
Volumen	**Volumen** [m³]= **π** * **r²**[m] * **L**[m]

que los motores PaP además de ser clasificados por su ángulo de paso o tipo de conexión, también se clasifican de acuerdo al tamaño de su carcasa. Por ejemplo un motor de tamaño 11 tiene un diámetro de 1.1 pulgadas, de la misma manera uno de 23 tiene 2.3 pulgadas de diámetro, este tipo de clasificación lo definió la NEMA. Sin embargo el largo de un motor puede variar de acuerdo a su modelo, sin importar su clasificación de tamaño. Por regla general el torque de un motor PaP se incrementa con el largo de su cuerpo.

Las características de torque-velocidad son la clave para seleccionar el motor adecuado para una aplicación específica. A continuación se brinda un ejemplo de dimensionamiento para un motor con un juego de engranajes que gire un disco de acero, muy parecido al del sistema de posicionamiento de filtros.

Características del disco:

- Diámetro del disco= 30 cm.

- Espesor del disco= 0.5 cm.
- Material= acero (densidad 7,850 kg/m^3).
- Resolución= 1.8^o por paso.
- Tiempo de aceleración= 0.05 s.
- Torque resistente durante el movimiento referido al eje del motor: 0,5 N-m.
- Reductor = 20:1.
- Inercia del reductor = $1{,}4351{\cdot}10^{-4} kgm^2$

Utilizando las fórmulas del cuadro B.2 se calcula el momento de inercia para el disco:

$$J_{disco} = \pi \cdot L \cdot \rho \cdot r^4/2 = \frac{\pi \cdot 0{,}005 \cdot 7850 \cdot 0{,}3^4}{2} \approx 0{,}5[kg \cdot m^2] \tag{B.3}$$

$$J_{total} = J_{reductor} + J_{disco}/i^2 = 1,4351 \cdot 10^{-4} + 0{,}5/20^2 = 0{,}0013935[kg \cdot m^2] \tag{B.4}$$

Donde i es la razón de reducción por el juego de engranes.

Si cada paso se configura en el instrumento virtual para que se realice en 0.05 segundos, y cada revolución se lleva a cabo con 200 pasos, el disco girará a 6 RPM. Utilizando la ecuación B.2 obtenemos el torque para acelerar el cuerpo:

$$T_{acel}[N.m] = 0{,}0013935[kg - m^2] \cdot (6[RPM]/0{,}05[s]) \cdot 2\pi/60 = 0{,}017511[N.m] \tag{B.5}$$

De la ecuación B.1, el torque necesario para mover el disco es:

$$T_{motor} = 0{,}017511 + 0{,}5 = 0{,}517511[N.m] \tag{B.6}$$

Sin embargo, este es el torque necesario para mover el disco antes de que se haya escogido un motor e incluído la inercia del rotor del motor. Por lo que ahora se procede a seleccionarlo. Por ejemplo una opción razonable sería el motor 780079-01 de National Instruments, el cual es un modelo NEMA 23 de 24 VDC. Su inercia del rotor es de 0.0248 $kg - m^2$, valor insignificante por lo que no afectaría los cálculos anteriores.

En la gráfica de la figura B.7 se observa la carácterística torque velocidad del 780079-01, se observa que el factor de seguridad aquí es aproximadamente 0.88 N.m/0.517511 N.m, es decir, un factor de 1,7 o 60 % sobre el valor máximo de torque resistivo. En el cuadro B.3 se muestran las características principales, brindadas por el fabricante.

Este sistema trabajará sin problemas, pero como medida adicional en caso de seguridad se puede escojer un reductor de relación mas grande, por ejemplo, 30:1, que reducirá la inercia de la carga en relación a la inercia del motor.

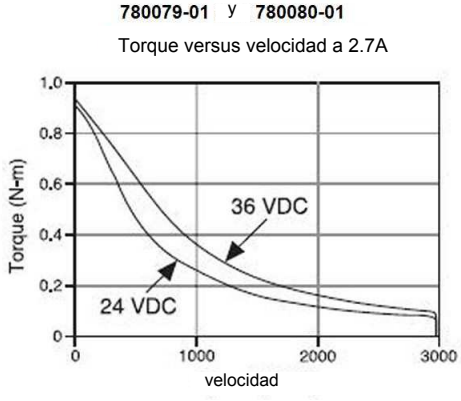


Figura B.7: Curva de velocidad torque para el 780079-01 de National Instruments

Cuadro B.3: Características del motor seleccionado

Número de parte	Amps/fase	Torque de retención	Inercia del rotor
780079-01	2.7	1.27 N.m	0.0248 kg-m$^2 * 10^{-3}$
Inductancia/fase	Resistencia/fase	Máxima velocidad	Resistencia térmica ^{0}C/watt
4.6 mH	0.85 ohms	3000 rpm	4.64

Propuesta de fuente de alimentación

A partir del modelo de motor seleccionado en el Anexo **??**, que requería de 24V de alimentación y hasta 2.7A por fase, se propone esta sencilla fuente lineal de 24V que puede entregar hasta 5 A, manejando una considerable potencia de 120W.

El diseño se basó en el circuito integrado LM338, un regulador lineal. Este integrado provee una tensión fija a la salida, dada por la relación de las resistencias R1 y R2, mientras que mantiene constante la corriente de salida hasta en 5A. En la entrada se tiene un transformador T1, un puente rectificador de diodos B1 y un capacitor electrolítico C1 de 10.000 μF. El

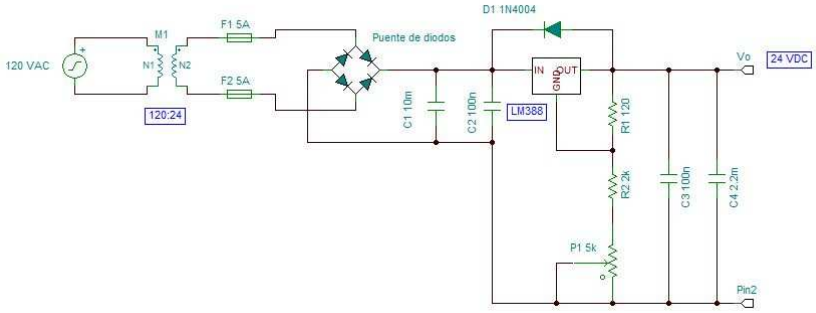


Figura B.8: Esquemático de la fuente propuesta

capacitor C1 se encarga de mantener la tensión lo suficientemente continua en la entrada del regulador, regulando una tensión de rizado de 8 V pico-pico.

En la salida del regulador se tiene en serie las resistencias R1 y R2 que definen el valor de la tensión de salida, y el preset de ajuste R3. Los capacitores C2 y C3 son recomendados por el fabricante para eliminar el posible ruido y mantener el circuito estable (bypass). El capacitor C4 ayuda a mantener la tensión de salida constante ante bruscas variaciones de carga.

En este diseño, el valor de R1 es fijo, 120 ohm. R2 y R3 determinan de que voltaje será la fuente, sus valores son $2k\Omega$ y 470Ω, respectivamente. Para el puente de diodos se puede utilizar un modelo integrado de hasta 20 A para tener muy bajas probabilidades de falla. Además en la entrada se deben conectar dos fusibles en cada terminal del secundario del transformador, de 5A, de esta forma evitamos que una corriente superior dañe el motor.

Para el LM388 un disipador de 10 x 15 cm, con 3 o 4 aletas de 3 cm a lo largo es suficiente.

Cuadro B.4: Componentes de la fuente de alimentación

T1	Transformador 120:24V 5A
B1	Puente de diodos 10 A
C1	10000μF
C2, C3	100 nF
C4	2200μF
U1	LM388
R1	120 ohm 1/8 W
R2	2k ohm 1/2W
R3	potenciometro 1 kΩ
D1, D2	1N4004

C Hojas de fabricante de los componentes usados en el proyecto completo

- Láser DLS-CH30 marca $DIMETIX^{®}$ http://www.dimetix.com/downloads/Manuals/DLS_FLS_C_TechnicalManual_V204_en.pdf
- Puente H https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf
- DM7405N http://html.alldatasheet.com/html-pdf/50889/FAIRCHILD/DM7405N/406/1/DM7405N.html
- PC817 ftp://ftp.elektroda.net/pub/Karty20katalogowe/pc817xx.pdf
- NTE3034A http://www.nteinc.com/specs/3000to3099/pdf/nte3034a.pdf